

O Efeito da Vegetação na Resistência ao Escoamento em Canais Naturais

ANA LUÍSA SOUSA VAZ

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Orientador: Professor Doutor João Pedro Gomes Moreira Pêgo

Coorientador: Professor Doutor Rodrigo Jorge Fonseca de Oliveira Maia

JULHO DE 2013

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha família

Só sentirás a falta da tua água quando o poço secar.

Bob Marley

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto sob a orientação do Professor João Pedro Pêgo e coorientação do Professor Rodrigo Maia, a quem agradeço todo o apoio e conhecimento que me foi transmitido. Também agradeço à Fundação para a Ciência e Tecnologia pelo financiamento prestado no âmbito do projeto PTDC/ECM/099752/2008. Gostaria ainda de agradecer ao Professor Rui Ferreira, Ana Margarida Ricardo e Pedro Sanches pela ajuda que forneceram.

Ao Tiago Silva agradeço a companhia, ajuda, empenho e tudo o que me ensinou.

Aos professores, e a todas as pessoas da secção de Hidráulica, agradeço pela ajuda, carinho e pelas condições que me foram providenciadas durante o decorrer deste último ano, e por tudo o que me ensinaram.

À minha família agradeço por tudo o que me transmitiram permitindo-me ser a pessoa que sou hoje.

Sem querer individualizar ninguém, com medo de deixar de fora alguém, agradeço a todos os amigos e colegas que me acompanharam durante todo o percurso académico. Um agradecimento especial a quem me acompanhou durante a realização deste trabalho, por tudo o que discutimos, ajudando-nos mutuamente para alcançar este objetivo.

RESUMO

A vegetação presente em canais naturais que recobre as planícies de inundação desempenha um papel crucial no equilíbrio dos sistemas fluviais. Foi, durante muitos anos, considerada fonte de resistência ao escoamento e retirada com o intuito de melhorar a sua circulação. Porém, nos últimos anos esta foi considerada como um meio de proporcionar estabilidade aos canais, sendo que hoje em dia muitas soluções de reabilitação passam por consolidar as margens de linhas de água através da coesão e estruturação do solo pelas raízes das plantas.

O objetivo da presente dissertação é compreender o escoamento no interior de zonas com vegetação emersa rígida e quantificar a resistência que esta confere ao escoamento com base nos princípios fundamentais da hidrodinâmica.

Para cumprir estes objetivos, foram realizados ensaios laboratoriais que reproduziram condições semelhantes às que se encontram na natureza. A vegetação era simulada através de hastes metálicas dispostas aleatoriamente e com várias densidades ao longo do canal. O trabalho prático consistiu na medição de campos de velocidades instantâneas utilizando a técnica não intrusiva Anemometria Laser-Doppler (LDA), tornando possível a avaliação das velocidades em vários planos do escoamento. Foi ainda efetuada a medição do escoamento em zonas sem vegetação de modo a poder ser efetuada uma analogia entre estes dois casos, e determinar as forças resistentes ao escoamento, em particular as causadas devido à existência de vegetação no leito.

O tratamento de dados recolhidos foi efetuado com base na metodologia *Double-Average*, devido à heterogeneidade característica destes escoamentos. O uso desta técnica permite caracterizar adequadamente a heterogeneidade do escoamento se existir um elevado número de perfis médios.

Os resultados obtidos permitiram concluir que a influência relativa do leito é maior nos casos com maior densidade de hastes e que as tensões dispersivas não são, em geral, desprezáveis quando comparadas com as tensões de Reynolds.

Foram ainda determinadas as tensões de arrastamento associadas ao leito do canal, à vegetação existente e respetivos coeficientes de resistência. Verifica-se que, na determinação dessas tensões, as primeiras diminuem com o aumento das segundas, proporcionando condições para estabilização do fundo e margens dos canais naturais.

PALAVRAS-CHAVE: vegetação emersa rígida, resistência ao escoamento, *LDA*, metodologia de média dupla espaço-temporal

ABSTRACT

The vegetation covering wetlands and floodplains plays a crucial role in fluvial ecosystems. It has been considered, for a long time, a source of flow resistance and, as such, removed in order to improve the flow circulation. However, over the last few years, the presence of vegetation has been considered as a mean to provide stability to waterline banks through cohesion and providing soil structure by the plant roots.

The aim of this thesis is to understand and analyze the flow with emergent and rigid vegetation and to quantify the forces acting on the stems and on the bed boundary based on the fundamental principles of hydrodynamics.

To meet the proposed objectives, conditions similar to those found in nature were reproduced in a laboratory facility. Emergent and rigid vegetation was replicated by metal stems arranged randomly with various densities along the channel. The practical work consisted of the measure of the instantaneous velocity, using a non-intrusive technique, Laser-Doppler Anemometry, in order to understand the distribution of the velocities of the flow. These was carried out several times, one of them in a non-vegetated area so that an analogy can be made between these two cases and define the flow resistance forces, particularly those caused by the existence of the vegetation.

The data treatment was done based on the Double-Average Methodology (DAM), to express the great spatial variability of the flow. The results can be influenced if the profile's location doesn't make a correct representation of the flow spatial variability.

The results reveal that the relative influence of the bed increases with the stems density and the form-induced stresses cannot be neglected when compared to Reynolds stresses. It was also showed that, for the cases with higher stems density the flow resistance was also higher.

The drag associated with the channel bed and the vegetation drag were also a focus of this paper, as well as their respective coefficients. The results disclose that as the bed shear stress decreases, the latter increases, providing the conditions for stabilization of natural channel's bed and banks.

KEYWORDS: Emergent rigid vegetation, flow resistance, LDA, double-average methodology

Índice Geral

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V

1 INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. METODOLOGIA	2
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2

2 ESCOAMENTOS COM SUPERFÍCIE LIVRE	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. ESCOAMENTOS TURBULENTOS E CAMADA LIMITE	6
2.2.1. ESCOAMENTOS TURBULENTOS	6
2.2.2. CAMADA LIMITE	8
2.2.3. EQUAÇÕES DE NAVIER-STOKES.....	8
2.2.4. EQUAÇÕES REYNOLDS AVERAGED NAVIER-STOKES (RANS)	9
2.3. METODOLOGIA DUPLA MÉDIA - DAM (<i>DOUBLE AVERAGE METHODOLOGY</i>)	13
2.3.1. EQUAÇÕES DOUBLE AVERAGED NAVIER-STOKES (DANS)	14
2.4. ESCOAMENTOS EM LEITOS SEM VEGETAÇÃO.....	17
2.5. ESCOAMENTOS EM LEITOS COM VEGETAÇÃO.....	20
2.5.1. VEGETAÇÃO SUBMERSA.....	23
2.5.2. VEGETAÇÃO EMERSA.....	24
2.6. RESISTÊNCIA AO MOVIMENTO	25
2.6.1. PARTIÇÃO DA TENSÃO DE ARRASTAMENTO	25
2.6.2. RESISTÊNCIA ASSOCIADA AO FUNDO	26
2.6.3. RESISTÊNCIA ASSOCIADA ÀS HASTES	27
2.6.3.1. Integração vertical das DANS	28

3 INSTALAÇÕES LABORATORIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	31
3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	31

3.2. INSTALAÇÕES LABORATORIAIS	31
3.2.1. CANAL PRISMÁTICO.....	31
3.2.2. INSTRUMENTAÇÃO.....	37
3.3. SISTEMA LASER DOPPLER ANEMOMETRY (LDA)	40
3.3.1. PRINCÍPIO DO LDA.....	40
3.4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	45
3.4.1. FASE I - ALTIMETRIA DE FUNDO E OSCILAÇÕES DA SUPERFÍCIE LIVRE	45
3.4.2. FASE II – MEDIÇÃO DOS CAMPOS DE VELOCIDADE	48
3.4.2.1. Zonas de Medição	48
3.4.2.2. Ensaios de medição dos campos de velocidade	52

4 TRATAMENTO DE DADOS E CARACTERIZAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	57
4.2. CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO	57
4.2.1. TOPOGRAFIA DO LEITO	57
4.2.2. OSCILAÇÕES DA SUPERFÍCIE LIVRE.....	58
4.2.3. FUNÇÃO DE VAZIOS.....	59
4.3. CARACTERIZAÇÃO DO CAMPO DE VELOCIDADES	62
4.3.1. COMPONENTE LONGITUDINAL DA VELOCIDADE	63
4.3.1.1. Perfis Verticais da Velocidade Média Espaço-Temporal	63
4.3.1.2. Perfis Transversais da Velocidade Média Espaço-Temporal.....	65
4.3.2. COMPONENTE VERTICAL DA VELOCIDADE.....	69
4.3.2.1. Perfis Verticais da Velocidade Média Espaço-Temporal	69
4.3.2.2. Perfis Transversais da Velocidade Média Espaço-Temporal.....	70
4.4. CARACTERIZAÇÃO DOS PERFIS DE TENSÃO NORMAL E TANGENCIAL	74
4.4.1. PERFIS DE TENSÃO NORMAL	75
4.4.2. PERFIS DE TENSÃO TANGENCIAL	78

5 EFEITO DA VEGETAÇÃO NA RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO

5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	81
5.2. RESISTÊNCIA ASSOCIADA AO FUNDO	81

5.3. RESISTÊNCIA ASSOCIADA ÀS HASTES.....	87
6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	91
BIBLIOGRAFIA.....	93
ANEXOS.....	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Exemplo de um escoamento com superfície livre [1]	5
Figura 2.2 – Regimes de Escoamentos detetados nas experiências de Reynolds: a) Regime laminar; b) Regime de transição; c) Regime turbulento (Novais Barbosa, 1985).....	6
Figura 2.3 – Variação do regime de escoamento consoante o número de Reynolds (Chow, 1973)	7
Figura 2.4 – Exemplo de perfis de velocidade em canais (Novais Barbosa, 1986)	8
Figura 2.5 – Flutuações de velocidade ao longo do tempo em escoamentos turbulentos.....	10
Figura 2.6 – Flutuação da velocidade média evidenciando a dupla média e a perturbação espacial .	13
Figura 2.7 – Matriz dos termos que surgem no processo de média temporal/espacial e espacial/temporal (Pokrajac et al., 2008).....	16
Figura 2.8 – Divisão do escoamento em camadas (adaptado de Nezu e Nakagawa (1993))	17
Figura 2.9 – Divisão do escoamento em regiões específicas: a) leito impermeável; b) leito permeável (adaptado de Nikora e Goring (2001))	18
Figura 2.10 – Exemplo de um escoamento em leito com vegetação [2]	20
Figura 2.11 – Vista de cima de um escoamento com vegetação emergente ao longo da margem direita (sombra cinzenta) (adaptado de Nepf, 2012)	21
Figura 2.12 – Esquemas de esteiras formadas atrás de um cilindro, com diâmetro D , de acordo com o número de Reynolds (Massey, 2002)	22
Figura 2.13 – Vista de cima de um escoamento com vegetação emergente em forma circular (adaptado de (Nepf, 2012))	23
Figura 2.14 – Perfis de velocidade em escoamentos com vegetação submersa com crescente densidade de rugosidade (adaptado de Nepf (2011)): a) Disperso – $ah \ll 0,1$; b) $ah \approx 0,1$; c) denso: $ah > \approx 0,23$	24
Figura 2.15 – Perfis de velocidade para três rácios de profundidade H/h : a) Vegetação rasa; b) Vegetação com pequeno rácio H/h ; c) Vegetação Emersa (adaptado de Nepf e Vivoni (2000))	25
Figura 2.16 – Representação de leitos com diferentes rugosidades: a) leito liso; b) leito de transição; c) leito rugoso (Chow, 1973)	26
Figura 3.1 - Esquema de parte do circuito hidráulico do canal	32
Figura 3.2 – Válvula de Regulação de caudal numa conduta de Ferro Fundido de 250 mm	32
Figura 3.3 – Caudalímetro (a) e o seu visor (b)	33
Figura 3.4 – Estrutura metálica de apoio da estrutura de entrada do canal	33
Figura 3.5 – Cascalho fino (Fernandes, 2012).....	34
Figura 3.6 – Material granular constituinte do fundo rugoso.....	34
Figura 3.7 – Haste metálica a) (Fernandes, 2012); Conjunto de hastes vistas de jusante b)	35
Figura 3.8 – Variação da densidade de hastes no canal.....	35
Figura 3.9 – Soleira a jusante	36

Figura 3.10 – Comporta basculante na estrutura de saída	36
Figura 3.11 – Sistema de inclinação variável.....	36
Figura 3.12 – Bombas centrífugas	37
Figura 3.13 – Tanque superior de regulação do caudal.....	37
Figura 3.14 – Cabeça do laser (a); e controlador (b)	38
Figura 3.15 – Placa de aquisição de dados e cabo <i>usb</i>	38
Figura 3.16 - Termómetro.....	39
Figura 3.17 – Cabeça do laser (a); Sonda do laser (b)	39
Figura 3.18 – Foto-detetor (a); Processador de dados (b).....	40
Figura 3.19 – Pares de feixes emitidos para medição de duas componentes (Dantec Dynamics).....	41
Figura 3.20 – Movimento de uma partícula através do volume de medição (Zhang, 2010).....	41
Figura 3.21 – Remoção da ambiguidade direcional com a alteração da frequência (Dantec Dynamics)	43
Figura 3.22 – Modelo das franjas do princípio do <i>LDA</i> e sinal “ <i>Doppler Burst</i> ” (Zhang, 2010)	43
Figura 3.23 – Princípio do <i>LDA</i> (adaptado de Dantec Dynamics)	44
Figura 3.24 – Canal sem presença de vegetação (Fernandes, 2012).....	45
Figura 3.25 – Laser portátil montado no sistema de apoio	46
Figura 3.26 – Vista de cima do ensaio de medição da superfície livre do escoamento (a); Dispositivo para a medição da superfície livre (b)	46
Figura 3.27 – Pontos de medição transversais no ensaio de oscilações da superfície livre	47
Figura 3.28 – Janela de captura de dados no LabView	47
Figura 3.29 – Sistema do referencial de coordenadas <i>X, Y</i> e <i>Z</i>	48
Figura 3.30 – Perfil longitudinal com pormenor das zonas de medição segundo o eixo dos <i>XX</i>	48
Figura 3.31 – Exemplo da malha de pontos verticais no ponto <i>X = 9,025 m</i>	50
Figura 3.32 – Exemplo da influência da refração no ponto <i>Y=10 mm</i> (a linha a verde não apresenta refração e a linha a vermelho apresenta a refração resultante da mudança entre o meio ar-água)	51
Figura 3.33 - Zonas de medição segundo o eixo dos <i>YY</i>	51
Figura 3.34 – Janela do <i>BSA Flow Software</i>	54
Figura 3.35 – Janela do <i>BSA Flow Software</i> com aquisição de uma componente	55
Figura 3.36 – Resumo de cada ensaio no <i>BSA Flow Software</i>	55
Figura 3.37 – Exemplo do formato de armazenamento dos valores de velocidade medidos com o processador de duas componentes	56
Figura 3.38 - Exemplo do formato de armazenamento dos valores de velocidade medidos com o processador de uma componente	56
Figura 4.1 – Exemplo da topografia do leito no plano <i>P₀</i>	58

Figura 4.2 – Variação da topografia do fundo ao longo dos planos de medição entre hastes.....	58
Figura 4.3 – Variação da superfície livre e do leito na região com vegetação	59
Figura 4.4 – Exemplo do princípio da determinação da função de vazios para o caso de P_0	60
Figura 4.5 – Função de vazios em P_7	61
Figura 4.6 – Funções de vazios de P_0 a P_6	61
Figura 4.7 – Perfis verticais médios temporais (\bar{u}_i nas linhas ponteadas) em cada ponto transversal e perfil médio no espaço e no tempo ($\langle \bar{u} \rangle$ na linha contínua escura) de P_0	63
Figura 4.8 – Perfis verticais médios temporais (\bar{u}_i nas linhas ponteadas) em cada ponto transversal e perfil médio no espaço e no tempo ($\langle \bar{u} \rangle$ na linha contínua escura) de P_7	64
Figura 4.9 – Perfis velocidade média no tempo e no espaço, $\langle \bar{u} \rangle_i$, dos perfis P_1 a P_7	64
Figura 4.10 – Perfis Transversais da componente longitudinal da velocidade em P_1	66
Figura 4.11 – Perfis Transversais da componente longitudinal da velocidade em P_2	66
Figura 4.12 – Perfis Transversais da componente longitudinal da velocidade em P_3	67
Figura 4.13 – Perfis Transversais da componente longitudinal da velocidade em P_4	67
Figura 4.14 – Perfis Transversais da componente longitudinal da velocidade em P_5	68
Figura 4.15 – Perfis Transversais da componente longitudinal da velocidade em P_6	68
Figura 4.16 – Perfis Transversais da componente longitudinal da velocidade em P_7	69
Figura 4.17 – Perfis verticais da componente vertical da velocidade de P_1 a P_7	70
Figura 4.18 – Perfis Transversais da componente vertical da velocidade em P_1	70
Figura 4.19 - Perfis Transversais da componente vertical da velocidade em P_2	71
Figura 4.20 - Perfis Transversais da componente vertical da velocidade em P_3	72
Figura 4.21 - Perfis Transversais da componente vertical da velocidade em P_4	72
Figura 4.22 - Perfis Transversais da componente vertical da velocidade em P_5	73
Figura 4.23 - Perfis Transversais da componente vertical da velocidade em P_6	73
Figura 4.24 - Perfis Transversais da componente vertical da velocidade em P_7	74
Figura 4.25 – Distribuição vertical das tensões normais de Reynolds da componente longitudinal	75
Figura 4.26 – Distribuição vertical das tensões normais Reynolds da componente vertical	76
Figura 4.27 - Distribuição vertical das tensões normais dispersivas da componente longitudinal u	76
Figura 4.28 – Distribuição vertical das tensões normais dispersivas componente vertical	77
Figura 4.29 – Distribuição Vertical das tensões totais da componente longitudinal	77
Figura 4.30 - Distribuição Vertical das tensões totais da componente vertical	78
Figura 4.31 – Distribuição vertical das tensões tangenciais de Reynolds	79
Figura 4.32 – Distribuição vertical das tensões tangenciais dispersivas	79
Figura 5.1 – Tendência logarítmica do perfil de velocidade em P_0	82

Figura 5.2 - Tendência logarítmica do perfil de velocidade em P ₁	82
Figura 5.3 - Tendência logarítmica do perfil de velocidade em P ₂	83
Figura 5.4 - Tendência logarítmica do perfil de velocidade em P ₃	83
Figura 5.5 - Tendência logarítmica do perfil de velocidade em P ₄	84
Figura 5.6 - Tendência logarítmica do perfil de velocidade em P ₅	84
Figura 5.7 - Tendência logarítmica do perfil de velocidade em P ₆	85
Figura 5.8 - Tendência logarítmica do perfil de velocidade em P ₇	85
Figura 5.9 – Zonas de variação de densidade de hastes e os sete planos de medição: verde – 400 hastes/m ² ; amarelo – 800 hastes/m ² ; laranja – 1200 hastes/m ² ; vermelho – 1600 hastes/m ²	88

ÍNDICE DE QUADROS (OU TABELAS)

Tabela 2.1 – Termos e significado físico dos termos das DANS (Campbell, 2005; Lory, 2011)	15
Tabela 3.1 – Zonas de medição e respectivas densidades de hastes	49
Tabela 3.2 – Zonas de medição transversal no ar e na água.....	52
Tabela 4.1 – Características do escoamento em cada plano de medição	59
Tabela 4.2 – Funções de Vazios nas zonas de medição do laser.....	62
Tabela 4.3 – Valores Médios no espaço e no tempo da velocidade na componente longitudinal nos vários planos de medição (m/s)	65
Tabela 4.4 – Número de Reynolds das hastes	65
Tabela 4.5 – Determinação das tensões normais.....	75
Tabela 4.6 - Determinação das tensões tangenciais	75
Tabela 5.1 – Tensão e coeficiente de arrastamento no fundo.....	86
Tabela 5.2 – Determinação do coeficiente de resistência e coeficiente de Manning-Strickler para a tensão do fundo.....	87
Tabela 5.3 – Valores do coeficiente de Manning-Strickler, K , para vários tipos de superfície (Novais Barbosa, 1986)	87
Tabela 5.4 – Características do escoamento em cada plano	89
Tabela 5.5 – Forças e coeficientes de resistência das hastes	89
Tabela 5.6 – Características de cada plano ignorando os planos P_4 e P_5	90
Tabela 5.7 - Forças e coeficientes de resistência das hastes	90
Tabela 5.8 - Determinação do coeficiente de resistência e coeficiente de Manning-Strickler para tensões totais	90

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

DAM – Double Average Methodology

DANS – Double Averaged Navier-Stokes

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

IST – Instituto Superior Técnico

LDA – Laser Doppler Anemometry

RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes

A_f – Área ocupada pelo fluido (m^2)

A_t – Área total (m^2)

C_f – Coeficiente de arrastamento do fundo

C_R – Coeficiente de arrastamento de uma haste

d – Diâmetro das hastes (m)

$\langle \bar{f}_D \rangle$ – Força de arrastamento média na direção do escoamento por unidade de comprimento de haste (N/m)

$\langle \bar{f}_x \rangle$ – Força de arrastamento exercida numa haste, por unidade de área (N/m^2)

g_i – Componente da aceleração gravítica na direção i (m/s)

H – Altura do escoamento (m)

h – Altura das hastes (m)

K – Coeficiente de Manning-Strickler ($m^{1/3}/s$)

n_i – Componente normal do vetor unitário normal à interface sólido/liquido na direção da superfície livre

p – Pressão instantânea (N/m^2)

\bar{p} – Pressão média temporal (N/m^2)

$\tilde{p} \equiv \bar{\tilde{p}}$ – Flutuação espacial da pressão média temporal (N/m^2)

Q – Caudal (l/s)

R_h – Raio hidráulico (m)

Re – Número de Reynolds

Re_D – Número de Reynolds das hastes

Re_* – Número de Reynolds característico da rugosidade

S_{int} – Superfície de interface entre a parte sólida e a parte líquida do volume de controlo (m^2)

t – Tempo (s)

U – Velocidade característica do escoamento (m/s)

- u – Componente da velocidade na direção longitudinal (m/s)
- u_* – Velocidade de atrito (*shear velocity*) (m/s)
- u_i – Componente da velocidade segundo a direção i (m/s)
- \bar{u} – Velocidade longitudinal média temporal (m/s)
- u' - Flutuação turbulenta da velocidade longitudinal (m/s)
- $\tilde{u} \equiv \bar{\tilde{u}}$ – Flutuação espacial da velocidade longitudinal média (m/s)
- $\langle \bar{u} \rangle$ – Velocidade longitudinal média temporal e espacial (m/s)
- V_f – Volume do fluido (m^3)
- X – Distância longitudinal (m)
- Y – Distância transversal (m)
- w – Componente da velocidade na direção vertical (m/s)
- \bar{w} – Velocidade vertical média temporal (m/s)
- w' - Flutuação turbulenta da velocidade vertical (m/s)
- $\tilde{w} \equiv \bar{\tilde{w}}$ – Flutuação espacial da velocidade vertical média (m/s)
- $\langle \bar{w} \rangle$ – Velocidade vertical média temporal e espacial (m/s)
- Z – Distância vertical (m)
- ΔH – perda de energia
-
- γ – Peso volúmico (N/m^3)
- ρ - Massa volúmica (kg/m^3)
- ν - Viscosidade cinemática da água (m^2/s)
- μ - Viscosidade dinâmica da água ($kg/m\ s$)
- Ψ - Função de vazios
- τ_b – Tensão de arrastamento no fundo (Pa)
- τ_i – *Transit Time* (us)
- τ_T – Tensão de arrastamento total (Pa)

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

A vegetação emersa que cobre as margens e planícies de inundação fluviais cumpre um papel fundamental no equilíbrio ambiental dos ecossistemas. Esta influencia as condições hidrodinâmicas do escoamento, sendo que apresenta impactos na resistência hidráulica e na turbulência do mesmo (Nepf, 1999; Yen, 2002), mas também revela-se relevante na proteção face à erosão do fundo e margens

É de extrema importância, nos casos de proteção contra a erosão, prever e limitar a fração da tensão que atua no leito do escoamento. A força total de arrastamento num escoamento com vegetação divide-se na parcela de tensão atuante na vegetação e outra parcela aplicada no leito, responsável pela erosão do mesmo. Assim, a diminuição da parcela da tensão no leito está ligada à das hastes uma vez que a diminuição da primeira é conseguida através do aumento da segunda através da implementação de vegetação mais densa.

Os métodos laboratoriais e numéricos que têm vindo a ser desenvolvidos procuram expressar a complexidade hidrodinâmica deste tipo de escoamentos sendo que este é um assunto ainda não totalmente compreendido.

Na tentativa de compreender os fenómenos hidrodinâmicos dos escoamentos com vegetação, têm sido realizados, nos últimos anos, vários estudos com âmbitos e abordagens diferentes, desde estudos experimentais em laboratório, medições no terreno ou modelos numéricos. Técnicas como *Laser Doppler Anemometry* (LDA), *Laser Doppler Velocimetry* (LDV), *Particle Image Velocimetry* (PIV), entre outras, têm sido desenvolvidas para melhorar a caracterização dos escoamentos concedendo um conhecimento aprofundado sobre o assunto e dando oportunidade para a discussão de resultados.

Contribuições recentes como a apresentada por Nepf (1999), é um exemplo de um estudo com recurso a trabalho laboratorial e cujo objetivo era quantificar a resistência do fluido através da determinação da força de arrastamento gerada devido a um conjunto de hastes de forma circular, e posteriormente relacioná-la com a função de densidade de hastes ou com o número de Reynolds. Outros trabalhos, por outro lado, procuram compreender os processos físicos neste tipo de escoamentos ao analisarem a velocidade e turbulência dentro de um conjunto de hastes cilíndricas, como o caso de Nepf e Vivoni (2000), usando também métodos experimentais laboratoriais. A variação da posição da vegetação nos canais também foi alvo de estudo no trabalho de Naot e Nezu (1996), e o trabalho de Nikora et al. (2008) abordou o efeito da remoção parcial e total da vegetação num curso natural. Muitos investigadores desenvolvem modelos numéricos para escoamentos que atravessem regiões com vegetação, disposta uniformemente, com o intuito de prever o escoamento médio e a estrutura da

turbulência, por exemplo através dos trabalhos de Lopez e Garcia (2001). Estudos semelhantes a estes últimos têm sido feitos para os casos de escoamentos atmosféricos, por exemplo o trabalho realizado por Finnigan (2000). Existe ainda uma contribuição importante de Liu et al. (2010), onde é simulada a vegetação com duas camadas de vegetação, em contraste aos estudos anteriores onde apenas tem sido simulada vegetação emersa ou vegetação submersa.

Esta dissertação insere-se no projeto PTDC/ECM/099752/2008 financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia.

1.2. OBJETIVOS

No presente estudo pretende-se i) caracterizar detalhadamente o escoamento no interior de zonas com vegetação emersa rígida e ii) quantificar as forças resistentes ao escoamento exercidas pelas hastes, e correspondente coeficiente de resistência, e as forças resistentes exercidas pelo fundo do canal. Estes objetivos são alcançados através de trabalho laboratorial, em condições controladas, recorrendo à técnica não intrusiva de medição de velocidades do escoamento denominada Anemometria Laser-Doppler.

Este estudo baseia-se nos princípios fundamentais da hidrodinâmica de escoamentos turbulentos.

1.3. METODOLOGIA

O trabalho é essencialmente laboratorial e teórico baseado nos princípios fundamentais da hidrodinâmica, caracterizando o escoamento em secções de controlo definidas.

Em laboratório estuda-se o comportamento hidrodinâmico de um escoamento turbulento em leito com vegetação emersa rígida, sendo executada a medição da velocidade de escoamento em secções de controlo definidas. A medição da velocidade foi conseguida através do uso da técnica *LDA*.

Devido à grande heterogeneidade característica de escoamentos com vegetação, o tratamento de dados é efetuado com recurso à metodologia DAM, *Double Averaged Methodology* (Nikora e Goring, 2001), obtendo perfis de velocidade médios, nas componentes longitudinal e vertical, no tempo e no espaço, assim como perfis das tensões dispersivas e de Reynolds.

Com base nas medições e resultados obtidos, determinam-se as forças aplicadas nas hastes e no fundo e respetivos coeficientes de resistência, e comparam-se os valores obtidos entre si e com resultados existentes na literatura.

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação é composta por seis capítulos organizados como explicado nos parágrafos seguintes.

No Capítulo 1 é apresentada a introdução à dissertação, com uma breve referência aos estudos realizados sobre o tema.

No Capítulo 2 é exposto o desenvolvimento da metodologia da dupla-média às equações do movimento. Este desenvolvimento parte das equações de Navier-Stokes, a partir das quais se procede à média temporal, obtendo as *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS) e que, por aplicação da DAM, dão origem às *Double-Average Navier-Stokes* (DANS).

No Capítulo 3 é efetuada uma descrição detalhada das instalações laboratoriais e equipamento usado, assim como o procedimento experimental e descrição dos ensaios.

No Capítulo 4 é descrito o tratamento dos dados efetuado e caracterização dos resultados obtidos.

No Capítulo 5 é exposto o efeito da vegetação na resistência ao escoamento através da quantificação da força de arrastamento nas hastes e no fundo, e respetivos coeficientes.

A dissertação é encerrada no Capítulo 6, onde se apresentam as conclusões finais e propostas para trabalhos futuros.

2 ESCOAMENTOS COM SUPERFÍCIE LIVRE

2.1. INTRODUÇÃO

O escoamento de fluidos com uma superfície não confinada sujeita à pressão atmosférica representa um dos problemas mais comuns da mecânica dos fluidos. Este tipo de escoamento em canais, ou rios, é caracterizado pela existência de uma superfície de contacto entre a corrente líquida e o meio gasoso, geralmente a atmosfera (Figura 2.1), denominada por superfície livre, conferindo a essa superfície pressão constante e igual à pressão no meio gasoso. (Novais Barbosa, 1985)



Figura 2.1 - Exemplo de um escoamento com superfície livre [1]

Em geral os escoamentos com superfície livre presentes na natureza são turbulentos. A identificação do regime do escoamento surge quando se relaciona o mesmo segundo a ordem de grandeza da velocidade das partículas. Esta classificação conduz à identificação de regimes de escoamento como

laminares, de transição ou turbulentos (Novais Barbosa, 1985). O presente estudo será direcionado à análise de escoamentos turbulentos.

2.2. ESCOAMENTOS TURBULENTOS E CAMADA LIMITE

2.2.1. ESCOAMENTOS TURBULENTOS

A identificação do regime turbulento, tendo em consideração as condições fronteira referidas anteriormente, é reconhecida ao observar o movimento de um escoamento com velocidades gradualmente crescentes, quando este parte inicialmente do repouso.

Para pequenos valores da velocidade o fluido move-se em camadas, ou lâminas, que deslizam umas sobre as outras, sem se misturarem, correspondendo a valores do número de Reynolds reduzidos (Figura 2.2 a). Neste tipo de regime qualquer tendência para turbulência é amortecida e as tensões predominantes são de natureza viscosa. Com o aumento progressivo da velocidade começa a verificar-se instabilidade nas camadas do regime laminar, indicando que este escoamento assume características semelhantes a um outro tipo, denominado como escoamento em regime de transição (Figura 2.2 b). Habitualmente, este regime apresenta números de Reynolds próximos do crítico, valor correspondente à transição de regime laminar para turbulento e vice-versa (Novais Barbosa, 1985).

Com contínuo aumento da velocidade o escoamento tende a evoluir para um outro tipo de regime, designado por turbulento, no qual a estrutura em lâminas inicial encontra-se completamente dissipada verificando-se mistura entre as diferentes camadas do fluido (Figura 2.2 c).

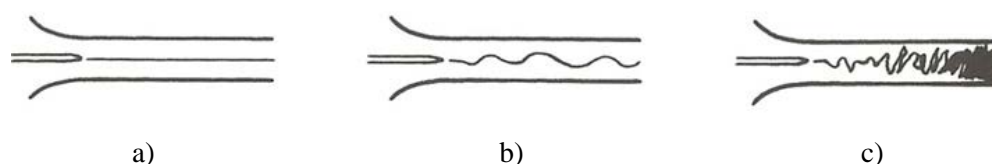


Figura 2.2 – Regimes de Escoamentos detetados nas experiências de Reynolds: a) Regime laminar; b) Regime de transição; c) Regime turbulento (Novais Barbosa, 1985)

Posto isto, admite-se que a turbulência não é uma característica dos fluidos, mas do próprio escoamento, sendo que as principais características deste regime encontram-se enumeradas de seguida (Tennekes, 1972):

- Irregularidade

A turbulência é uma condição irregular do movimento, uma vez que as diferentes grandezas em causa apresentam variações no espaço e no tempo (Figura 2.5). Tal facto impossibilita a sua caracterização determinística, sem a ajuda da supercomputação, pelo que as grandezas envolvidas são consideradas aleatórias (Tennekes, 1972; Hinze, 1975)

- Difusividade

Esta característica é responsável pela rápida mistura e um aumento das taxas de quantidade de movimento, calor e transferência de massa.

- Número de Reynolds elevado

Os escoamentos turbulentos são geralmente associados a números de Reynolds elevados, que podem ser determinados segundo a expressão (2.1), onde U é a velocidade característica do escoamento, R_h o raio hidráulico, ρ é a massa volúmica e ν e μ representam a viscosidade cinemática e viscosidade dinâmica do fluido, respetivamente. Na Figura 2.3 é possível observar a distinção do regime de escoamento em canais consoante a variação do número de Reynolds.

$$Re = \frac{\rho U R_h}{\mu} = \frac{U R_h}{\nu} \quad (2.1)$$

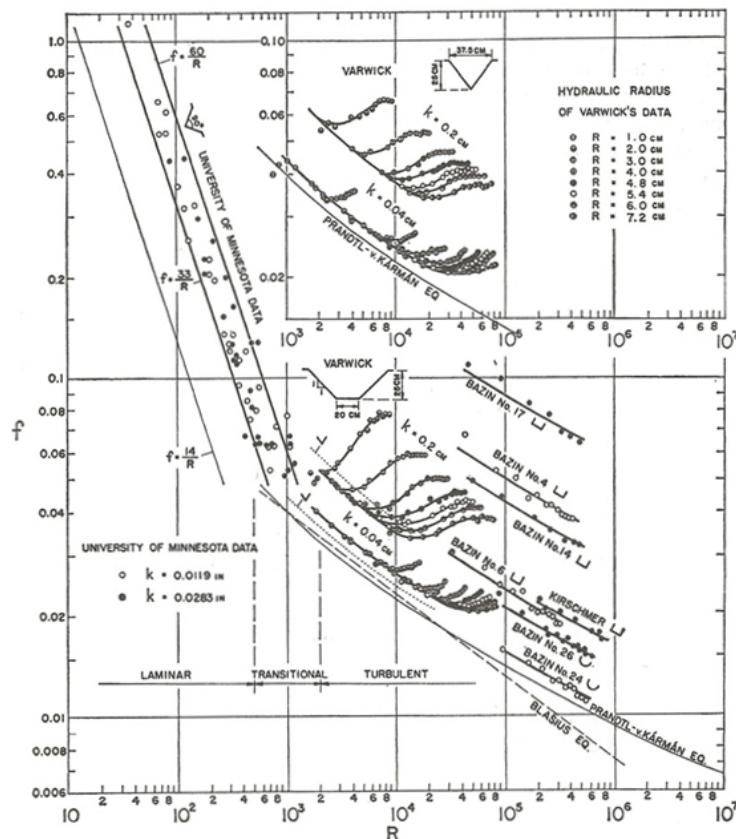


Figura 2.3 – Variação do regime de escoamento consoante o número de Reynolds (Chow, 1973)

- Flutuações Tridimensionais de Vorticidade

A turbulência, rotacional e tridimensional, caracteriza-se por elevados níveis de vorticidade flutuante, ausente nos escoamentos bidimensionais.

- Dissipação

Aos regimes turbulentos está sempre associada uma elevada dissipação de energia. Estes regimes necessitam de um fornecimento contínuo exterior de energia para compensar as perdas viscosas e para que a turbulência não seja amortecida.

- Meio Contínuo

A turbulência é um fenómeno contínuo pois verifica-se que mesmo as mais pequenas escalas são de ordem de grandeza muito superior a qualquer escala molecular.

2.2.2. CAMADA LIMITE

Os escoamentos de fluidos apresentam duas características fundamentais (Massey, 2002):

- Não há descontinuidade na velocidade;
- A velocidade sobre uma superfície sólida, em relação à superfície, é nula.

Atendendo a estes dois factos verifica-se a existência de uma zona, junto à superfície sólida, na qual a velocidade cresce rapidamente desde zero (devido à condição de não deslizamento da superfície sólida) até à velocidade do fluido na corrente principal (Figura 2.4). Esta zona é correntemente denominada por camada limite sendo que não existe uma linha nítida de demarcação.

Nesta zona, o aumento da velocidade com a distância indica a existência de movimento relativo de partículas no interior da camada limite que implica a existência de tensões tangenciais relevantes.

Segundo Prandtl, citado no trabalho de Novais Barbosa (1985), o escoamento pode ser dividido em duas zonas: o escoamento na camada limite e fora dela, onde os gradientes da velocidade são diminutos e o efeito da viscosidade é desprezável.

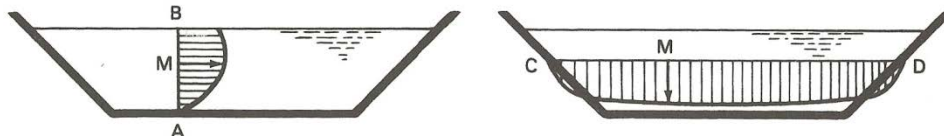


Figura 2.4 – Exemplo de perfis de velocidade em canais (Novais Barbosa, 1986)

2.2.3. EQUAÇÕES DE NAVIER-STOKES

As equações de Navier-Stokes traduzem a conservação da quantidade de movimento nos fluidos em movimento e formam um conjunto de leis fundamentais governativas do escoamento de fluidos em geral e em canais, em particular.

Para fluidos newtonianos (fluido em que cada componente da tensão tangencial é linearmente proporcional ao gradiente da velocidade na direção normal a essa componente) e escoamentos incompressíveis, a equação de Navier-Stokes, (2.2), toma a seguinte configuração (Novais Barbosa, 1985; Pope, 2001):

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2.2)$$

em que u_i representa a componente da velocidade segundo a direção i , g_i reproduz a componente da ação gravítica na direção i , p refere-se à pressão local do fluido. A notação tensorial foi usada de acordo com $(x_1, x_2, x_3) \equiv (x, y, z)$ e $(u_1, u_2, u_3) \equiv (u, v, w)$, sendo que os eixos x , y e z são

orientados nas direções longitudinal, transversal e vertical do escoamento, respetivamente, e u , v e w representam as componentes da velocidade longitudinal, transversal e vertical.

Fisicamente pode descrever-se a Equação (2.2) como:

- $\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$: Forças de inércias;
- g_i : Forças gravíticas;
- $\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i}$: Forças devidas a pressão;
- $\nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}$: Forças viscosas.

Porém, como foi referido anteriormente, as variáveis envolvidas nos escoamentos turbulentos apresentam-se como aleatórias o que significa que existe uma inconsistência entre a natureza aleatória destes escoamentos e a essência determinística das equações do movimento. Tal facto deve-se à observação de dois fenómenos (Pope, 2001):

- Em todos os escoamentos há inevitavelmente variações das condições iniciais, propriedade dos materiais e condições fronteira;
- Os escoamentos turbulentos revelam grande sensibilidade às perturbações descritas acima.

Neste sentido foram desenvolvidas as equações de Reynolds com o intuito de facilitar o estudo destes escoamentos.

2.2.4. EQUAÇÕES REYNOLDS AVERAGED NAVIER-STOKES (RANS)

As equações *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS) têm como base fazer a análise do escoamento aos seus valores médios, e surgem da adaptação das equações de Navier-Stokes.

O processo de adaptação das equações de Navier-Stokes nas Reynolds Averaged Navier-Stokes inicia-se introduzindo o operador da média temporal às primeiras equações e posteriormente inserir o conceito de decomposição de Reynolds. Esta decomposição consiste na separação do valor instantâneo das variáveis dos escoamentos nos seus valores médios temporais e respetivas flutuações (2.3), como se exemplifica na Figura 2.5 para o caso da velocidade.

A decomposição de Reynolds, sob a forma de uma variável genérica, θ , apresenta-se como:

$$\theta = \bar{\theta} + \theta' \quad (2.3)$$

onde a barra horizontal superior indica a média temporal e a plica representa a flutuação temporais (ver Figura 2.5). De realçar que a média das flutuações é nula, (2.4):

$$\bar{\theta'} = 0 \quad (2.4)$$

A Equação de Navier-Stokes aplicada aos valores médios virá:

$$\overline{\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}} = \overline{g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}} \quad (2.5)$$

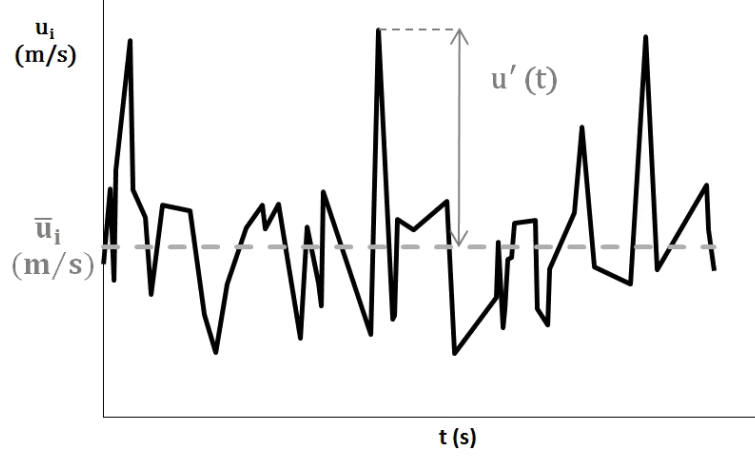


Figura 2.5 – Flutuações de velocidade ao longo do tempo em escoamentos turbulentos

Como foi mencionado anteriormente, as variáveis envolvidas neste tipo de escoamentos são consideradas como aleatórias, o que torna pertinente relembrar algumas propriedades de variáveis aleatórias. Se X e Y forem duas variáveis do escoamento aleatórias, então verificam-se as seguintes relações:

$$\begin{aligned} X &= \bar{X} + X' & \overline{X + Y} &= \bar{X} + \bar{Y} \\ \bar{X} &= \bar{X} & \overline{X \cdot Y} &= \bar{X} \cdot \bar{Y} + \overline{X' \cdot Y'} \\ \overline{X \cdot Y'} &= 0 & \overline{X' \cdot Y} &= \bar{X} \cdot \bar{Y} \\ \frac{\partial^2 \bar{X}}{\partial s^2} &= \frac{\partial^2 X}{\partial s^2} & \frac{\partial \bar{X}}{\partial s} &= \frac{\partial X}{\partial s} \end{aligned}$$

Atendendo a que g_i não tem flutuação turbulenta e ρ é constante, então a Equação (2.5) resulta em

$$\overline{\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}} = \overline{g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}} \quad (2.6)$$

e aplicando seguidamente a decomposição de Reynolds vem:

$$\overline{\frac{\partial u_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + u'_j \frac{\partial u'_i}{\partial x_j}} = \overline{g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}} \quad (2.7)$$

A partir das relações entre variáveis aleatórias mencionadas acima é possível desenvolver a equação (2.7) para

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \overline{u'_j \frac{\partial u'_i}{\partial x_j}} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2.8)$$

A parcela das flutuações é ainda passível de se resumir à derivada

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u'_i u'_j}) = \overline{u'_i \frac{\partial u'_j}{\partial x_j}} + \overline{u'_j \frac{\partial u'_i}{\partial x_j}} \quad (2.9)$$

e deduz-se com o auxílio da Equação da Continuidade, que será enunciada de seguida tanto em valores instantâneos como em valores médios.

Para valores instantâneos, a equação da continuidade, que traduz a propriedade geral de conservação da massa pode ser escrita como

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2.10)$$

e para escoamentos com fluidos incompressíveis a equação anterior simplifica-se ficando

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2.11)$$

Aplicada a valores médios, a equação (2.10), desenvolve-se e apresenta-se de seguida

$$\overline{\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial \rho}{\partial t}} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial}{\partial x_j} [\bar{\rho}(\bar{u}_j + u'_j)] + \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} \quad (2.12)$$

Sabendo que ρ é constante, a equação da continuidade para valores médios em escoamentos incompressíveis (independentemente do movimento ser ou não permanente) representa-se:

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2.13)$$

Multiplicando a equação da continuidade (2.11) pelo valor médio da velocidade segundo a direção i , resulta

$$u_i \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2.14)$$

e, em valores médios aplicando posteriormente a decomposição de Reynolds à expressão anterior vem:

$$\overline{u_i \frac{\partial u_j}{\partial x_j}} = \bar{u}_i \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} + \overline{u'_i \frac{\partial u'_j}{\partial x_j}} = 0 \quad (2.15)$$

Porém como demonstrado pela equação da continuidade para valores médios, a primeira parcela do lado direito da equação anterior é nula, o que significa

$$\overline{u_i \frac{\partial u_j}{\partial x_j}} = \overline{u'_i \frac{\partial u'_j}{\partial x_j}} = 0 \quad (2.16)$$

Fica assim demonstrado que a parcela das flutuações da Equação (2.8) se altera, como referido, modificando a forma final das RANS como apresentado na Equação (2.17) (Pope, 2001; Novais Barbosa, 1985).

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u'_i u'_j}) + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2.17)$$

As diferenças entre as equações de Navier-Stokes (2.2) e as de Reynolds (2.17) residem no facto destas últimas substituírem os valores instantâneos das primeiras por valores médios, e pela presença da parcela que traduz o efeito da turbulência do escoamento, expressão (2.18).

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u'_i u'_j}) \quad (2.18)$$

A parcela, representada em (2.18), é muito importante no contexto das RANS. O tensor

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} \quad (2.19)$$

é designado como o tensor das tensões de Reynolds.

2.3. METODOLOGIA DUPLA MÉDIA - DAM (DOUBLE AVERAGE METHODOLOGY)

O uso das RANS serve os propósitos da modelação e interpretação numérica e experimental. Porém, neste tipo de escoamentos é corrente usarem-se parâmetros médios no espaço, como por exemplo o coeficiente de rugosidade, sendo que não é específico de um ponto (Franca et al., 2008; Nikora e Goring, 2001; Nikora, McEwan, et al., 2007; Nikora, McLean, et al., 2007; Pokrajac et al., 2008). Verifica-se portanto a necessidade de introduzir a média espacial às RANS.

A metodologia Dupla Média é portanto um processo no qual se procede à média, tanto temporal como espacial, dos termos de velocidade e pressão constantes nas equações fundamentais dos escoamentos. De referir que a passagem das RANS para as DANS representa um “*upscaling*”, ou seja, são estudados os escoamentos a escalas maiores, não desprezando porém as pequenas escalas que influenciam o escoamento.

Em geral, há duas formas de se obter este tipo de equações, sendo que o resultado de cada uma será o mesmo. A primeira resulta de aplicar a média espacial às equações RANS já introduzidas, uma vez que já se encontram com valores médios temporais. O segundo método é o oposto e obtém-se através do cálculo inicial da média espacial nas equações com variáveis instantâneas e de seguida a aplicação da média temporal. Porém, independentemente do processo escolhido, os termos resultantes das duas operações são idênticos como se pode verificar no resumo presente na Figura 2.7.

Irá ser adotado o primeiro procedimento, pois este apresenta-se como o mais indicado para descrever escoamentos em leitos rugosos. Proceder à média tempo-espaço vai de encontro com as tradições no estudo da turbulência, contrariamente ao segundo método, que não apresenta muitos procedimentos experimentais que o sustentem (Nikora, McEwan, et al., 2007).

No contexto da metodologia da dupla média adota-se uma decomposição de Reynolds adaptada com o intuito de se ter em consideração a variabilidade espacial (Franca et al., 2010)

$$\theta = \langle \bar{\theta} \rangle + \tilde{\theta} + \theta' \quad (2.20)$$

onde $\langle \bar{\theta} \rangle$ representa a dupla média, $\tilde{\theta}$ a flutuação espacial e θ' reproduz a flutuação temporal da variável em causa (Figura 2.6).

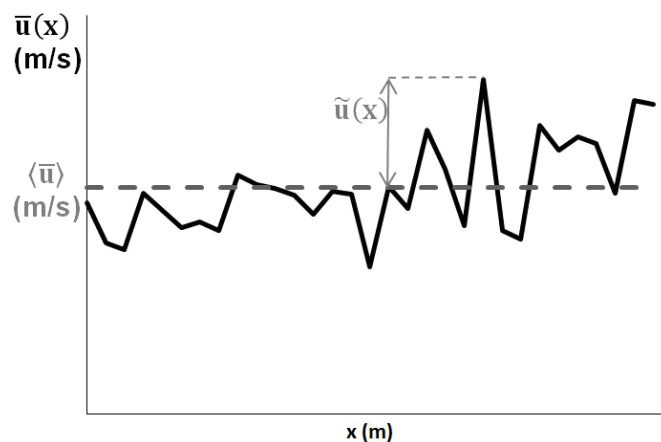


Figura 2.6 – Flutuação da velocidade média evidenciando a dupla média e a perturbação espacial

A definição do operador dupla média aplicada a uma variável genérica, θ , é definido por (Nikora, McEwan, et al., 2007):

$$\langle \theta \rangle(x, y, z) = \frac{1}{V_f} \int_{V_f} \theta dV \quad (2.21)$$

Neste contexto V_f representa o volume do fluido onde se pretende obter o valor da dupla média.

2.3.1. EQUAÇÕES DOUBLE AVERAGED NAVIER-STOKES (DANS)

Para obter a forma final das DANS é necessário introduzir os procedimentos e os teoremas que permitiram obter este conjunto de equações a partir das RANS (Nikora, McEwan, et al., 2007).

O primeiro, conhecido como o teorema geral do transporte serve como ferramenta para proceder à média espacial das derivadas temporais:

$$\left\langle \frac{\partial \theta}{\partial t} \right\rangle = \frac{1}{\Psi} \frac{\partial \Psi \langle \theta \rangle}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \iint_{S_{int}} \theta v \cdot n dS \quad (2.22)$$

Tal como anteriormente V_f representa o volume do fluido, S_{int} é a superfície de interface entre a parte sólida e a parte líquida do volume de controlo, n é a componente normal do vetor unitário normal ao leito do canal na direção da superfície livre, v é a velocidade no leito do escoamento e Ψ representa a função de vazios. Esta função corresponde à fração de área ocupada pelo fluido, ou seja, a relação entre a área de fluido (A_f) e a área total (A_t) a uma determinada cota (z).

$$\Psi = \Psi(z) = \frac{A_f(z)}{A_t} \quad (2.23)$$

O segundo teorema é conhecido como o teorema da média espacial:

$$\left\langle \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \right\rangle = \frac{1}{\Psi} \frac{\partial \Psi \langle \theta \rangle}{\partial x_i} + \frac{1}{V_f} \iint_{S_{int}} \theta n_i dS \quad (2.24)$$

Por último, a manipulação das RANS após aplicação do operador dupla-média resulta nas equações DANS (Nikora et al., 2004; Nikora, McEwan, et al., 2007; Franca et al., 2010):

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial t} + \langle \bar{u}_j \rangle \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} \\
&= g_i - \frac{1}{\rho \Psi} \frac{\partial (\Psi \langle \bar{p} \rangle)}{\partial x_i} - \frac{1}{\Psi} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Psi \langle v \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \rangle - \Psi \langle \bar{u}'_i \bar{u}'_j \rangle - \Psi \langle \tilde{u}_j \tilde{u}_i \rangle \right) \\
&+ \frac{1}{\rho V_f} \iint_{S_{int}} \bar{p} n_j dS - \frac{1}{V_f} \iint_{S_{int}} v \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} n_j dS
\end{aligned} \quad (2.25)$$

Especificamente, e em termos simples, a equação anterior consiste em termos de aceleração do fluido à esquerda equilibrada com parâmetros de força por unidade de massa à direita. Os seus parâmetros-chave definem-se como descrita na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Termos e significado físico dos termos das DANS (Campbell, 2005; Lory, 2011)

	Termo	Significado
a.	$\frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial t}$	Aceleração local
b.	$\langle \bar{u}_j \rangle \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j}$	Aceleração convectiva
c.	g_i	Aceleração da gravidade
d.	$\frac{1}{\rho \Psi} \frac{\partial (\Psi \langle \bar{p} \rangle)}{\partial x_i}$	Gradiente de pressão (força por unidade de massa)
e.	$\frac{1}{\Psi} \frac{\partial \Psi \langle \bar{u}'_i \bar{u}'_j \rangle}{\partial x_j}$	Gradiente das tensões de Reynolds (ou gradiente das tensões turbulentas)
f.	$\frac{1}{\Psi} \frac{\partial \Psi \langle \tilde{u}_i \tilde{u}_j \rangle}{\partial x_j}$	Gradiente das tensões dispersivas
g.	$\frac{1}{\Psi} \frac{\partial}{\partial x_j} \Psi \langle v \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \rangle$	Gradiente das tensões viscosas
h.	$\frac{1}{\rho V_f} \iint_{S_{int}} \bar{p} n_j dS$	Resistência de forma (por unidade de massa)
i.	$\frac{1}{V_f} \iint_{S_{int}} v \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} n_j dS$	Resistência Viscosa (por unidade de massa)

A equação (2.25) difere das RANS ao apresentar três importantes termos adicionais: tensões dispersivas, resistência de forma e resistência viscosa indicadas na Tabela 2.1 com as letras f, h e i respectivamente.

A parcela das tensões dispersivas, $\langle \tilde{u}_i \tilde{u}_j \rangle$ advém do proceder à média espacial, de igual forma que as tensões de Reynolds, $\langle u'_i u'_j \rangle$ resultam da média temporal. Na Figura 2.7 é apresentada uma matriz dos termos que surgem quando se efetua a média no tempo e no espaço. A célula de baixo, à esquerda, marca o ponto de partida com as variáveis instantâneas. As restantes células mostram o resultado da média efetuada. A média temporal é efetuada subindo ao longo da coluna, desde o fundo para o início da matriz, e encontra-se conotada com os símbolos \uparrow . Cada procedimento resulta em dois termos: a média das flutuações $\overline{\quad}$ e o produto das médias temporais $\overline{\quad} \overline{\quad}$. A média espacial desenvolve-se da esquerda para a direita ao longo das linhas e encontra-se identificada por $\langle \quad \rangle \rightarrow$. Este processo produz dois termos: a média do produto das flutuações espaciais $\langle \tilde{\quad} \tilde{\quad} \rangle$ e o produto das médias espaciais $\langle \quad \rangle \langle \quad \rangle$ (Pokrajac et al., 2008).

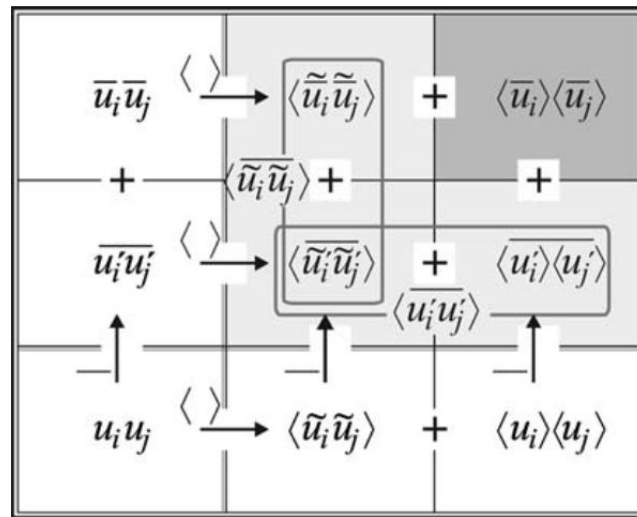


Figura 2.7 – Matriz dos termos que surgem no processo de média temporal/espacial e espacial/temporal (Pokrajac et al., 2008)

A aplicação da média espacial a equações que já apresentam valores com médias temporais foi desenvolvida gradualmente através das contribuições de Smith e McLean (1977), Wilson e Shaw (1977), Raupach e Shaw (1982), Finnigan (1985), Raupach et al. (1991), Wang e Tackle (1994), (Giménez-Curto e Lera, 1996) citados nos trabalhos Nikora e Goring (2001) e Nikora, McEwan, et al. (2007). O primeiro marca o início da aplicação desta técnica no contexto de canais com fronteiras rugosas.

A utilização da técnica de dupla média apresenta várias vantagens das quais se destacam (Nikora, McEwan, et al., 2007; Nikora e Goring, 2001):

- Ligação consistente entre as médias espaciais dos parâmetros de rugosidade, tensões de corte do leito e as variáveis médias, tanto espacial como temporal, do escoamento;
- Aparecimento da resistência viscosa, resistência de forma e tensões dispersivas resultantes de uma derivação rigorosa;

- Possibilidade de escalonamento de considerações e parametrização baseado nas variáveis médias temporais e espaciais;
- Possibilita a partição, em escalas consistentes, dos parâmetros de rugosidade e propriedades do escoamento. Fornece melhor definição dos parâmetros hidráulicos como a uniformidade do escoamento, bidimensionalidade e a tensão de corte no leito.

Por outro lado, a principal restrição deste método prende-se com a exigência deste ter de apresentar uma ampla separação da escala de turbulência e do escoamento médio (Nikora, McEwan, et al., 2007).

2.4. ESCOAMENTOS EM LEITOS SEM VEGETAÇÃO

As propriedades da turbulência em escoamentos de superfície livre, sobre leitos lisos e com grandes valores de submergência (quociente entre a altura da água e o diâmetro médio da granulometria do leito), têm sido estudadas nas últimas décadas e encontram-se bem clarificadas. Porém, o uso do estudo destes escoamentos recorrendo à análise de dupla média (temporal e espacial) é recente (desde início do século XXI). Com as contribuições de Nikora e Goring (2001) e Nikora (2007), foi possível fazer a ligação entre os parâmetros do escoamento (velocidade, pressão e os seus momentos) e os parâmetros da rugosidade do leito que surgem quando se efetua a média espacial até então desprezados.

Com o intuito de estudar os escoamentos com superfície livre, Nezu e Nakagawa (1993) sugeriram a divisão do escoamento por camadas, de forma a listar as principais características de cada região, como por exemplo tensões predominantes e velocidades características (Figura 2.8).

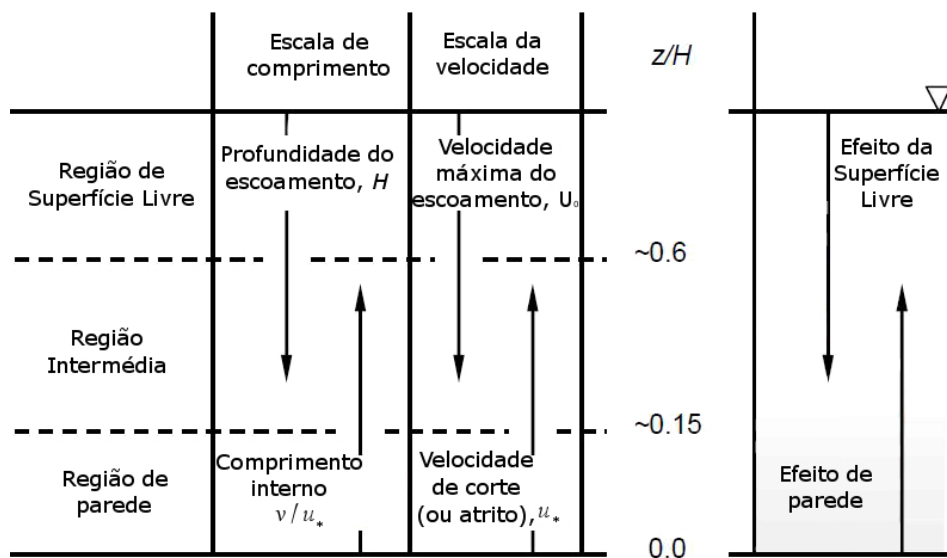


Figura 2.8 – Divisão do escoamento em camadas (adaptado de Nezu e Nakagawa (1993))

Com a introdução dos ditos parâmetros rugosos, a divisão dos escoamentos com superfície livre proposta por Nezu e Nakagawa (1993) foi revista para apresentar referência específica à dupla média apresentada por Nikora e Goring (2001), como se pode observar na Figura 2.9.

O critério de divisão, nos dois casos, tem por base um escoamento onde a altura do escoamento, H , é muito maior que a altura dos elementos rugosos, Δ .

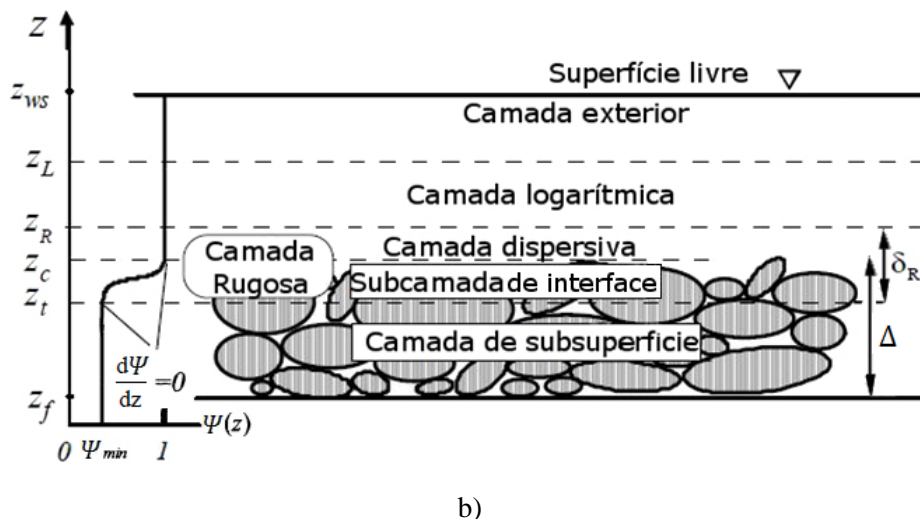
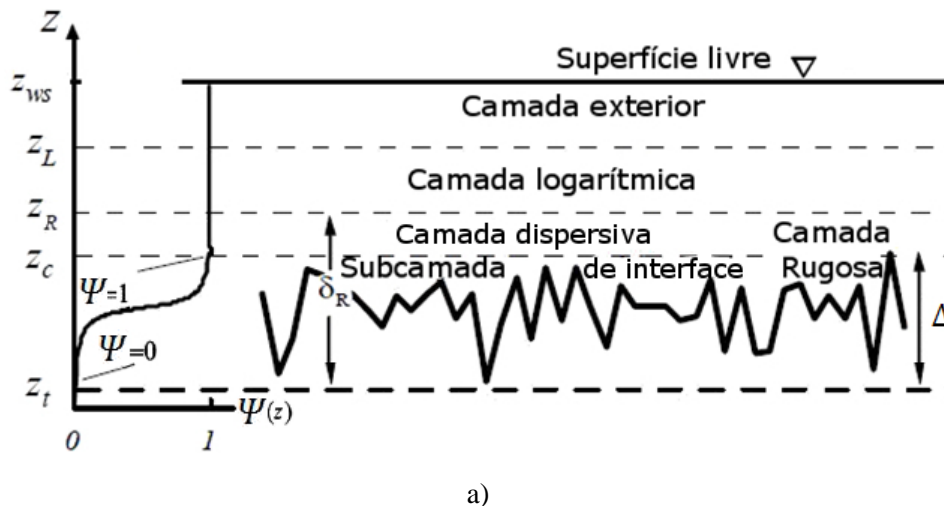


Figura 2.9 – Divisão do escoamento em regiões específicas: a) leito impermeável; b) leito permeável (adaptado de Nikora e Goring (2001))

Na imagem anterior, Ψ representa a função de vazios. As coordenadas verticais expõem os seguintes níveis: z_{ws} representa a elevação da superfície da água (*ws* representa *water surface* na terminologia inglês), z_L representa o limite superior da camada Logarítmica, z_R é o limite superior da camada Rugosa, z_c marca o nível da maior crista dos elementos rugosos, z_t marca o nível onde $\Psi = 0$ (leito impermeável), ou $d\Psi/dz = 0$ (leitos permeáveis), e z_f marca o nível do leito sólido (na terminologia inglês é referido como *floor*)

Verifica-se, portanto, o aparecimento de várias regiões específicas do escoamento, ou a falta deste, dependendo da altura do escoamento. As características de cada subcamada encontram-se listadas de seguida (Nikora e Goring, 2001; Campbell, 2005):

- Camada exterior

A dependência de efeitos viscosos ou de fluxos dispersivos nesta camada é desprezável, sendo que as DANS não apresentam informação adicional nesta zona quando comparadas com as RANS. Na

divisão por Nezu e Nakagawa (1993), esta camada corresponde à “Região de Superfície Livre” e é semelhante em leitos lisos.

É perceptível verificar que esta região apresenta uma fraca tensão de corte uma vez que os gradientes da velocidade são pequenos, quando comparados junto ao leito, fazendo com que, em leitos rugosos e lisos, esta região apresente as mesmas características turbulentas. Em ambos os casos, a camada exterior não é uma região que apresente predominantemente mecanismos que gerem turbulência, nem é um local de forte produção de energia turbulenta cinética.

As principais características da camada exterior são, portanto, a velocidade máxima, U_0 , que se assume que ocorra na superfície livre, e a altura do escoamento, H .

- Camada logarítmica

Os efeitos viscosos e os fluxos dispersivos são, de maneira idêntica à camada exterior, desprezáveis e as equações médias espaciais são idênticas às equações médias temporais. As principais características desta região são a velocidade de corte, u_* , distância acima do leito, z , e várias características do leito irregular rugoso (por exemplo o desvio padrão das alturas do leito entre outras características tanto na direção X , como na direção Z). O nome desta camada surge devido ao facto de a distribuição da velocidade média seguir uma lei logarítmica.

Para que esta camada exista é necessário que a altura do escoamento, H , seja muito maior que a altura dos elementos rugosos, Δ ($H \gg \Delta$). Tipicamente, esta camada é semelhante em casos com leitos lisos, e encontra-se na região entre $(2 - 5)\Delta < z < 0,2H$.

- Camada Rugosa

A divisão sugerida para esta camada foi feita com o intuito de descrever uma camada onde a região apresentasse a influência dos elementos rugosos. Mais concretamente foi dividida em duas subcamadas onde se apresentavam predominância de diferentes tipos de tensões.

- Camada dispersiva

Esta região encontra-se situada imediatamente abaixo da camada logarítmica e é a camada de topo da camada rugosa. Uma característica importante da sua localização refere-se ao facto desta se situar acima das cristas da rugosidade do leito e implica a influência do escoamento causando separação e vorticidade à volta de elementos individuais dependendo portanto das suas formas (na terminologia inglesa esta subcamada denomina-se por *form-induced sublayer*).

A partir desta subcamada as diferenças espaciais não podem continuar a ser desprezadas, fazendo com que as RANS não se adequem nesta região, como se verificou que era válido para os casos anteriores. Tal deve-se à grande influência que as variações espaciais locais têm no escoamento em qualquer ponto desta camada.

A espessura desta subcamada pode ser calculada como $\delta_R = z_R - z_C$ e pode ir até $(1 - 4)\Delta$.

- Subcamada de interface

A subcamada de interface é limitada pelas cristas e cavas dos elementos rugosos, sendo que estes influenciam fortemente o escoamento nesta zona. É importante de referir que as DNS entram em conta explicitamente com as tensões de forma e as forças de arrastamento viscoso.

- Camada de subsuperfície

Esta camada é definida apenas em escoamentos sobre leito permeável, pois inclui a análise do movimento do fluido nos espaços livres entre os elementos rugosos. O escoamento nesta região é impulsionado pela gravidade e o movimento do fluido sobrejacente.

Nesta camada, semelhante à camada rugosa, a principal característica é a velocidade de corte, u_* .

2.5. ESCOAMENTOS EM LEITOS COM VEGETAÇÃO

As planícies de inundação e zonas adjacentes, ao longo de cursos de água doce e salgada são importantes zonas de transição entre sistemas terrestres e aquáticos (Nepf, 1999). No entanto, a existência de vegetação, em cursos naturais (Figura 2.10), era habitualmente considerada como fonte de resistência ao escoamento e era, portanto, removida para permitir uma passagem mais conveniente e reduzir as inundações.

Posteriormente, verificou-se que a existência de ervas, arbustos e árvores permitiam uma melhoria na qualidade da água, porque estas possibilitam a absorção de nutrientes e produção de oxigénio promovendo a biodiversidade ao criar diferentes habitats ao longo dos cursos de água.



Figura 2.10 – Exemplo de um escoamento em leito com vegetação [2]

As plantas aquáticas convertem a energia cinética média em energia turbulenta cinética à escala da vegetação existente. Esta transferência, que está diretamente ligada à geração de turbilhões, afeta a tensão de arrastamento e a intensidade turbulenta do escoamento (Nepf, 1999).

A existência da tensão de arrastamento adicional, provocada pela presença de vegetação no escoamento, reduz a velocidade média do escoamento relativamente a escoamentos sem vegetação.

A turbulência pode-se apresentar com diferentes escalas de acordo com a origem da mesma. Por exemplo: a presença de vegetação e ramos, com orientação perpendicular ao escoamento, podem causar a geração de turbulência.

Define-se como o número de Reynolds das hastes (*stem Reynolds number* na literatura inglesa), a relação:

$$Re_D = \frac{Ud}{\nu} \quad (2.26)$$

em que U é a velocidade, d é o diâmetro das hastes e ν é a viscosidade cinemática. Quando $Re_D > \approx 100$ serão gerados vórtices de escala d (diâmetro das hastes), que se denomina como turbulência à escala das hastes (*stem-scale turbulence*). Caso a densidade das hastes for alta e o espaçamento médio entre hastes (ΔS) for superior a D , a turbulência gerada é à escala ΔS . A geração de vórtices absorve energia cinética do escoamento médio (expresso como a tensão média de arrastamento do conjunto de vegetação) alimentando assim a turbulência cinética (Nepf, 2012)

Como referido anteriormente, a existência da vegetação no curso do escoamento implica uma diminuição da velocidade do escoamento (Figura 2.11), devido a um aumento da resistência ao escoamento. A distribuição da vegetação no curso de água pode ainda dividir-se em dois grupos, uma em que esta cobre a largura do canal ou apenas uma parte, com largura b . Caso a vegetação cubra apenas uma largura do canal, verifica-se que grande parte do escoamento que se aproxima da zona com vegetação, se afasta desta efetuando preferencialmente o percurso que oferece menos resistência à sua passagem (Figura 2.11).

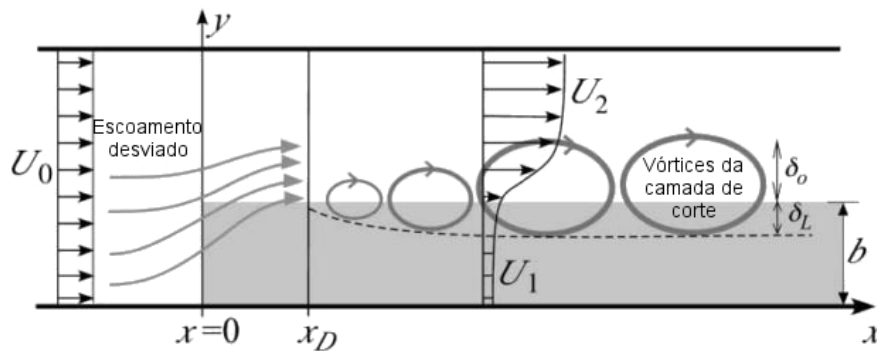


Figura 2.11 – Vista de cima de um escoamento com vegetação emergente ao longo da margem direita (sombra cinzenta) (adaptado de Nepf, 2012)

De realçar que na Figura 2.11 se encontra visível o limite de fim de desvio do escoamento/início dos vórtices (quando $x < x_D$, sendo que x_D marca o fim do desvio do escoamento e início da geração dos vórtices). Caso o perfil da velocidade apresente um ponto de inflexão, verifica-se um ponto de instabilidade, mais conhecido como instabilidade de Kelvin-Helmholtz, dando origem a vórtices na camada de corte (Nepf, 2012).

Correntemente, para estudar trechos de vegetação, em condições não naturais, são usados cilindros com diâmetro d . Diretamente atrás de um corpo sólido, existe uma zona de recirculação (Figura 2.12), seguido de um corredor de vórtices von Kármán. Estes vórtices, quando misturados com as escalas de turbilhões existentes, permitem a retoma da velocidade dentro dos vórtices com uma velocidade comparável com a de montante.

Essa zona de recirculação, verificada atrás de elementos individuais, varia consoante o número de Reynolds. Se este valor for muito baixo ($Re_D < 0,5$), as forças de inércia são desprezáveis, e as linhas de corrente apresentam-se como indicado na Figura 2.12 a). Ao aumentar o número de Reynolds das

hastes, Re_D , para valores situados entre 2 e 30, a camada limite separa-se simetricamente de ambos os lados do cilindro, nas posições S,S (Figura 2.12 b), onde se formam duas esteiras com sentidos de rotação opostos. O comprimento desta esteira é limitado, e as linhas de corrente unem-se a jusante. Com o aumento contínuo do valor de Re_D , a esteira alonga-se (Figura 2.12 c), sendo que neste caso as esteiras são mais instáveis que no caso anterior. Por fim, para valores na ordem dos 40~70 verifica-se a existência de oscilações da esteira (Figura 2.12 d).

Para valores superiores aos referidos anteriormente, geralmente acima de $Re_D = 90$ em escoamentos não confinados com cilindros circulares, os turbilhões desprendem-se do corpo sólido e são arrastados para jusante. De referir que estes limites do número de Reynolds dependem do grau de turbulência da corrente principal do escoamento, da forma do cilindro e da proximidade de outras superfícies sólidas.

Por último, no caso de valores de Re_D acima do valor limite, as esteiras formadas desprendem-se de ambos os lados, formando duas fiadas de vórtices, como denominado anteriormente como carreiro (ou dupla fiada) de vórtices de von Kármán (Massey, 2002). De realçar que a passagem de vórtices em regime laminar para turbulento tende a ocorrer quando $Re_D \approx 200$ (Nepf, 1999).

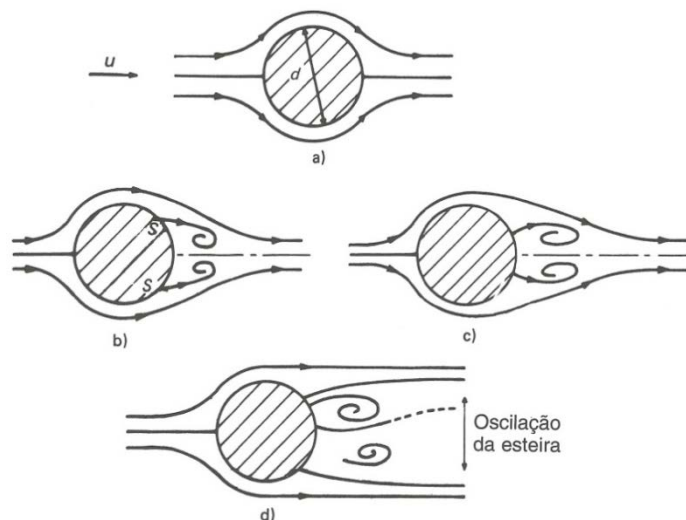


Figura 2.12 – Esquemas de esteiras formadas atrás de um cilindro, com diâmetro D , de acordo com o número de Reynolds (Massey, 2002)

Por outro lado, atrás de um conjunto de vegetação (como verificado na Figura 2.13) existem vórtices com escalas muito superiores aos previamente descritos. Tal deve-se ao facto que o escoamento que atravessa a vegetação atrasa a instalação do corredor de vórtices de von Kármán até à distância L_1 (Figura 2.13). Dentro desta região, a turbulência e a velocidade instalados no escoamento são relativamente mais baixas, tornando esta zona favorável à deposição de sedimentos suspensos no escoamento.

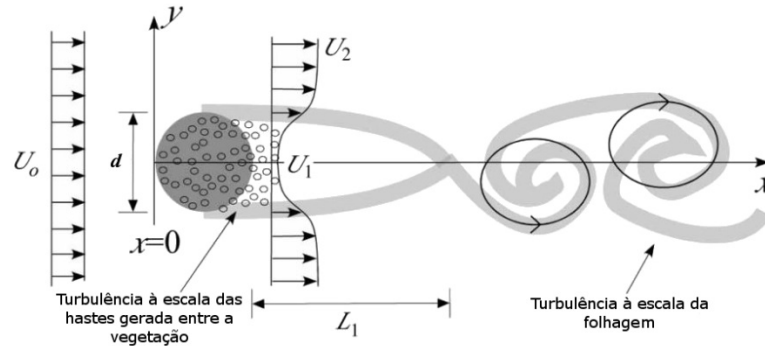


Figura 2.13 – Vista de cima de um escoamento com vegetação emergente em forma circular (adaptado de (Nepf, 2012))

Num escoamento natural, a vegetação existente pode ser de dois tipos: submersa ou emersa. Nos seguintes subcapítulos serão abordados estes temas sendo que no âmbito deste trabalho será estudado o grupo de vegetação emersa.

2.5.1. VEGETAÇÃO SUBMERSA

Dentro do grupo da vegetação submersa, existem dois limites no comportamento do escoamento que dependem da relação entre a tensão de arrastamento, do conjunto de vegetação existente, e a do leito do mesmo (Nepf, 2011).

Caso a força de arrastamento da vegetação for inferior à do leito, então a velocidade do escoamento segue um perfil semelhante ao apresentado em camada limite de escoamentos (a definição de camada limite encontra-se no subcapítulo 2.2.2) com a vegetação a contribuir para a rugosidade do leito, sendo que este limite representa o caso de vegetação dispersa (Figura 2.14 a). Neste caso verifica-se que a turbulência gerada deve-se, principalmente, aos turbilhões de hastes individuais (e que na Figura 2.13 é denominada por turbulência à escala das hastes). Com o aumento da densidade da vegetação verifica-se o aumento da turbulência devido à mesma, e a descontinuidade da tensão de arrastamento que se verifica no topo da vegetação gera uma região de corte.

No caso de vegetação densa, a tensão de arrastamento no conjunto da vegetação é superior à tensão no leito e a descontinuidade de arrastamento no topo da vegetação gera uma região de corte que inclui um ponto de inflexão no topo da vegetação (Figura 2.14 b e c). Nestes casos, a turbulência devido à vegetação apresenta uma parcela devido aos vórtices gerados dentro da camada de corte, devido à instabilidade Kelvin-Helmholtz (na Figura 2.13 encontra-se referida como turbulência à escala da folhagem).

Segundo o trabalho de Belcher et al. (2003), citado em Nepf (2012), a transição entre o limite denso e disperso ocorre quando a relação densidade de rugosidade (λ) é

$$\lambda = ah = 0.1 \quad (2.27)$$

onde h representa a altura da vegetação presente e a é a área frontal por volume. Esta última é relação entre o diâmetro característico da vegetação, d , e o quadrado do espaçamento médio entre cilindros, ΔS (Nepf, 1999).

$$a = \frac{dh}{\Delta S^2 h} \quad (2.28)$$

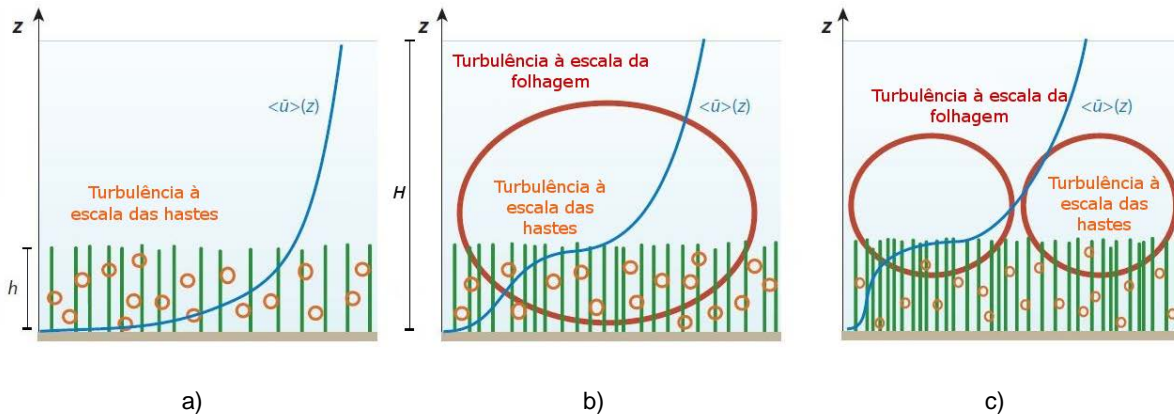


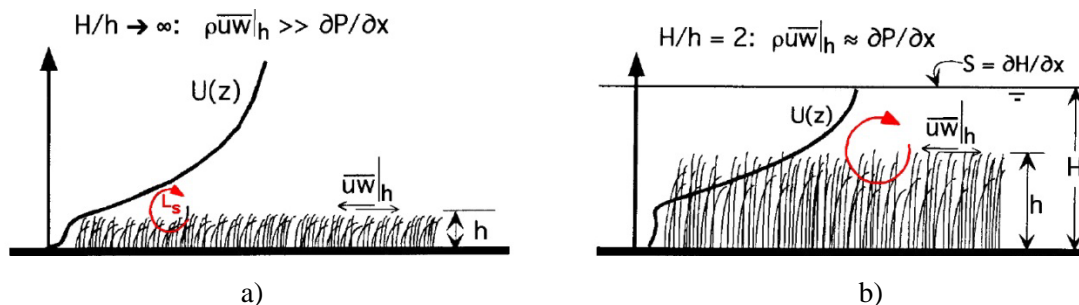
Figura 2.14 – Perfis de velocidade em escoamentos com vegetação submersa com crescente densidade de rugosidade (adaptado de Nepf (2011)): a) Disperso – $ah \ll 0,1$; b) $ah \approx 0,1$; c) denso: $ah > \approx 0,23$

Verifica-se portanto que, em escoamentos com vegetação submersa, o perfil de velocidades acima das hastes segue uma lei logarítmica como demonstrado no subcapítulo 2.4. A densidade da vegetação é também um fator importante na medida em que gera turbulência no escoamento a várias escalas como verificado na Figura 2.14, sendo que no topo da vegetação existe um transporte turbulento energético, controlado pela turbulência gerada na camada de corte, e valores inferiores na zona mais baixa, associados à menor turbulência gerada nessa zona (Nepf, 2011).

No presente estudo será simulado um escoamento turbulento, com vegetação emersa ao longo de toda a largura do canal.

2.5.2. VEGETAÇÃO EMERSA

O estudo de escoamentos com vegetação emersa não é tão vasto como o abordado no subcapítulo anterior, porém já existem algumas tendências comprovadas, no que diz respeito aos perfis de velocidade, escalas de turbulência gerada e tensões predominantes. Na Figura 2.15 encontram-se evidenciadas essas tendências, para três casos diferentes do valor do rácio H/h (quociente entre a altura de água e a altura da vegetação), englobando ainda a vegetação submersa para ser possível fazer uma comparação mais perceptível entre o caso de vegetação emersa e a estudada no subcapítulo anterior.



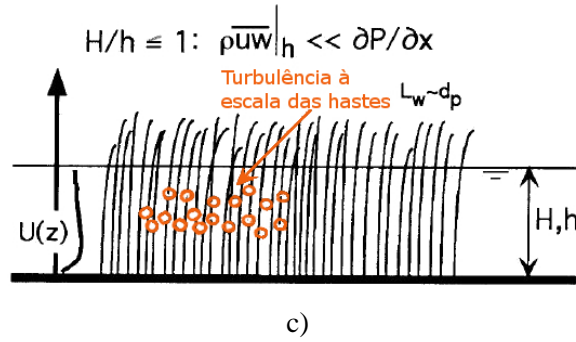


Figura 2.15 – Perfis de velocidade para três rácios de profundidade H/h : a) Vegetação rasa; b) Vegetação com pequeno rácio H/h ; c) Vegetação Emersa (adaptado de Nepf e Vivoni (2000))

Tipicamente no caso da Figura 2.15 a) existe o desenvolvimento de uma camada de corte no topo da vegetação (como já tinha sido apresentado na Figura 2.14 b e c) apresentando também turbilhões da camada de corte (apresentados nas figuras com setas a vermelho). Na Figura 2.15 a) L_s representa o comprimento da escala de corte (*shear length scale* na terminologia inglesa). Neste caso o momento de transporte turbulento vertical controla o escoamento dentro da vegetação (Nepf e Vivoni, 2000).

À medida que o rácio H/h diminui, o gradiente de pressões ($\partial P / \partial x$) dentro do conjunto da vegetação torna-se comparável às tensões turbulentas (Figura 2.15 b).

Por fim, quando $H/h = 1$, ou quando a vegetação se encontra emersa no escoamento ($H/h < 1$), a turbulência deixa de ser gerada predominantemente na camada de corte, L_s , para a gerada pela interferência do escoamento com a vegetação existente (esteira na literatura inglesa é denominada como *wake*, e portanto o comprimento dessa escala é denominada por L_w). No geral, nota-se uma diminuição da escala dos vórtices aquando da presença de vegetação emersa sempre que comparada com a vegetação submersa (Nepf e Vivoni, 2000).

2.6. RESISTÊNCIA AO MOVIMENTO

Um dos principais objetivos deste estudo é determinar o efeito da vegetação no escoamento de um canal natural. Para tal serão determinadas as tensões de arrastamento e coeficientes de arrastamento que se revelem pertinentes para este estudo.

2.6.1. PARTIÇÃO DA TENSÃO DE ARRASTAMENTO

Como já foi referido anteriormente, a vegetação tem um papel fundamental na proteção contra a erosão em leitos e margens dos cursos de água uma vez que esta leva a uma diminuição da tensão de arrastamento que atua no fundo do canal, parcela responsável pela remoção e transporte de partículas do solo (Thompson et al., 2004).

A tensão de arrastamento total num escoamento com vegetação, τ_T , pode ser dividida em duas componentes, uma parcela atuante nos elementos de rugosidade (na vegetação), $\langle \overline{f_x} \rangle$, e a outra parcela que atua no solo, τ_b , responsável pela erosão do fundo dos canais naturais (Raupach, 1992).

$$\tau_T = \langle \overline{f_x} \rangle + \tau_b \quad (2.29)$$

Ainda que o trabalho de Raupach (1992) seja direcionado para escoamentos atmosféricos esta teoria revela-se viável para a determinação das tensões de arrastamento neste tipo de escoamentos.

2.6.2. RESISTÊNCIA ASSOCIADA AO FUNDO

Neste subcapítulo será tratada a resistência associada ao fundo, em leitos sem vegetação. Esta parcela da resistência está diretamente ligada ao tipo de leito existente. Na Figura 2.16 encontram-se representados as três classificações impostas ao tipo de leito: leito liso, Figura 2.16 a), de transição, Figura 2.16 b), ou rugoso, Figura 2.16 c). Estas classificações resultam do número de Reynolds característico da rugosidade, Re_* , que é definido por:

$$Re_* = \frac{u_* k}{\nu} \quad (2.30)$$

onde u_* representa a velocidade de atrito, $u_* = \sqrt{\tau_b/\rho}$, ν é a viscosidade cinemática do fluido e k representa a escala geométrica dos elementos rugosos.

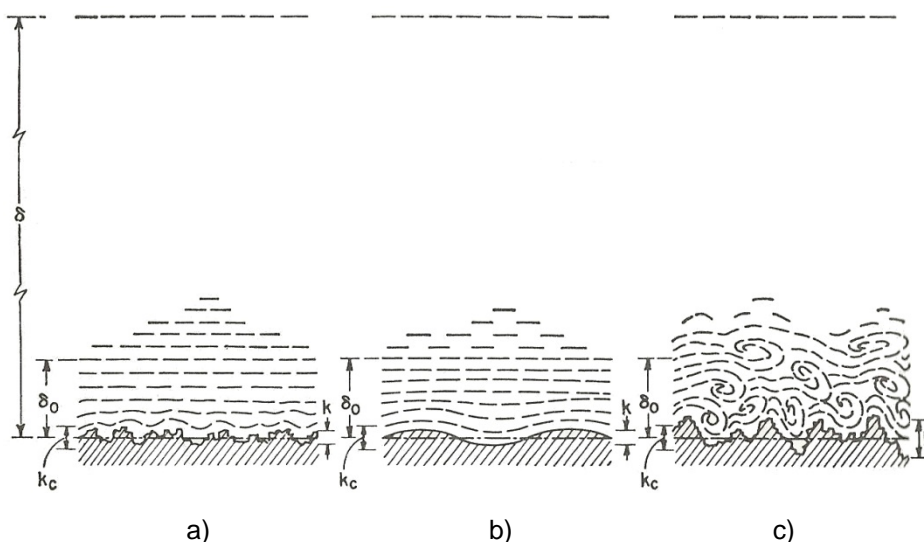


Figura 2.16 – Representação de leitos com diferentes rugosidades: a) leito liso; b) leito de transição; c) leito rugoso (Chow, 1973)

No caso de escoamentos sob fronteiras hidráulicamente lisas a influência da rugosidade é desprezável para a determinação da resistência ao escoamento e a força exercida no fundo é exclusivamente de natureza viscosa. A resistência ao escoamento com leitos rugosos é, contrariamente ao caso anterior, influenciada pela dimensão dos elementos constituintes do leito. Os efeitos da viscosidade são apenas sentidos numa pequena região que envolve os elementos rugosos. No caso intermédio, escoamentos em leitos de transição, a força exercida depende tanto dos elementos rugosos como da viscosidade.

Nos escoamentos com leitos lisos, e rugosos, a força de arrastamento no fundo pode-se retirar da distribuição vertical da componente longitudinal da velocidade:

$$\tau_b = \rho u_*^2 = \mu \left. \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right|_{z=0} \quad (2.31)$$

em que μ representa a viscosidade dinâmica do fluido. Porém, ao tratar valores médios impõe-se a necessidade de determinar o coeficiente de arrastamento no fundo, C_f . A estimativa deste coeficiente é feita através da integração vertical do perfil de velocidades retratada no trabalho de Ricardo (2008). A tensão de arrastamento relaciona-se com o coeficiente de arrastamento no fundo através da expressão seguinte:

$$\tau_b = \frac{1}{2} \rho C_f [\langle \bar{u} \rangle]^2 \quad (2.32)$$

2.6.3. RESISTÊNCIA ASSOCIADA ÀS HASTES

A definição das equações de resistência hidráulica em canais naturais implica o conhecimento do coeficiente de arrastamento das hastes da vegetação. Frequentemente relacionam-se os coeficientes de resistência empíricos com a velocidade, sendo que os mais comuns são os coeficientes de Manning-Strickler, n , Darcy-Weisbach, f , e Chezy, C (Yen, 2002). No entanto estes não são adequados para a aplicação no caso de leitos com vegetação devido à complexidade das formas geométricas da vegetação (Thompson e Wilson, 2002) e devido ao facto destas assumirem que a resistência ao escoamento é devida, principalmente, às tensões junto ao fundo e não de toda a coluna de água (Kadlec, 1990).

Foram, portanto, desenvolvidos estudos com o objetivo de determinar o coeficiente de resistência como os referidos anteriormente (Kadlec, 1990; Lopez e Garcia, 2001; Nikora et al., 2008)

Porém, a heterogeneidade espacial característica de escoamentos com vegetação torna indicado o estudo com base em valores médios espaciais e temporais (Nikora et al., 2008; Tanino e Nepf, 2008).

Assim, para caracterizar a parcela de arrastamento devido à vegetação, pode definir-se o coeficiente médio espacial e temporal através da expressão seguinte (Tanino e Nepf, 2008):

$$C_R = \frac{\langle \bar{f}_D \rangle}{\rho \langle \bar{u} \rangle^2 \langle d \rangle / 2} \quad (2.33)$$

onde $\langle d \rangle$ representa a largura característica das hastes das plantas (isto é, na dimensão perpendicular ao escoamento médio), $\langle \bar{f}_D \rangle$ é a força de arrastamento média na direção do escoamento por unidade de comprimento de haste, e calcula-se pela seguinte expressão (Tanino e Nepf, 2008):

$$\langle \bar{f}_D \rangle = \frac{\langle \bar{f}_x \rangle}{nh} \quad (2.34)$$

na qual $\langle \bar{f}_x \rangle$ é a força de arrastamento exercida nas hastes por unidade de área de hastes projetada no plano horizontal, n representa o número de hastes por unidade de área e h é a altura do escoamento.

A força $\langle \bar{f}_x \rangle$ é determinada através da integração vertical das DANS na direção longitudinal, onde todas as forças do escoamento são consideradas, e não só as forças gravíticas como era determinada nos estudos de Nepf (1999) e Tanino e Nepf (2008), por exemplo. A determinação de $\langle \bar{f}_x \rangle$ apresenta-se no subcapítulo seguinte.

2.6.3.1. Integração vertical das DANS

Com o objetivo de obter a parcela da força de arrastamento exercida nas hastes é necessário recorrer à integração da componente longitudinal das DANS na coluna de água, ou seja na vertical. Irá ser assumida a distribuição hidrostática de pressões, uma vez que esta simplificação conduz a um erro inferior a 1% (Ferreira et al., 2009).

Antes de proceder à integração da componente longitudinal das DANS é necessário enumerar as várias suposições adotadas e procedimentos de integração. Visto que serão medidas apenas a componente longitudinal e vertical da velocidade, é assumido que a velocidade transversal é nula ($v=0$ m/s). O valor da dupla média da componente vertical é aproximadamente zero em toda a coluna de água. Visto que o presente estudo aborda vegetação emersa rígida, o valor da função de vazios, Ψ , é constante no volume de controlo. As tensões viscosas consideram-se desprezáveis devido ao reduzido valor da viscosidade cinemática da água ($\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).

De acordo com estas hipóteses consideradas, a Equação (2.35) apresenta a componente longitudinal das DANS, para um escoamento permanente:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle \bar{u} \rangle^2}{\partial x} = g \frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x} - \frac{\partial \langle \bar{u}'^2 \rangle}{\partial x} - \frac{\partial \langle \tilde{u}^2 \rangle}{\partial x} - \frac{\partial \langle \bar{u}' w' \rangle}{\partial z} - \frac{\partial \langle \tilde{u} \tilde{w} \rangle}{\partial z} \\ + \frac{1}{\rho V_f} \iint_{S_{int}} \bar{p} n_x dS - \frac{1}{\rho V_f} \iint_{S_{int}} v \frac{\partial \bar{u}}{\partial x_i} n_i dS \end{aligned} \quad (2.35)$$

onde $\frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x}$ representa a variação da altura do escoamento.

Uma vez que será efetuada a média na vertical, torna-se pertinente apresentar a definição do valor médio vertical, apresentado com os parêntesis retos, []. Sob a forma de uma variável genérica, θ , o valor médio na vertical é definido por:

$$[\theta] = \frac{1}{h - z} \int_z^h \theta \, dz \quad (2.36)$$

Nesta integração também é vital recordar a regra de Leibniz

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \int_a^b \theta \, dz = \int_a^b \frac{\partial}{\partial \xi} \theta \, dz + \frac{\partial b}{\partial \xi} \theta|_b - \frac{\partial a}{\partial \xi} \theta|_a \quad (2.37)$$

e a condição de fronteira cinemática para a superfície livre (Ferreira, 2005):

$$\frac{\partial h}{\partial x} u|_H - w|_H = 0 \quad (2.38)$$

No Anexo A encontram-se os passos e simplificações adotados no desenvolvimento desta expressão. Tendo em atenção as regras de integração mencionadas acima, e integrando a Equação (2.36) vem:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho} \langle \overline{f_x^s} \rangle = \frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x} & \left(g \bar{H} + \left(\frac{1 \langle \bar{H} \rangle}{\frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x}} \left(\frac{\partial [\langle \bar{u} \rangle^2]}{\partial x} \right) + [\langle \bar{u} \rangle^2] - \langle \bar{u} \rangle^2|_H \right) \right. \\ & + \left(\frac{1 \langle \bar{H} \rangle}{\frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x}} \left(\frac{\partial [\langle \bar{u}'^2 \rangle]}{\partial x} \right) + [\langle \bar{u}'^2 \rangle] - \langle \bar{u}'^2 \rangle|_H \right) \\ & \left. + \left(\frac{1 \langle \bar{H} \rangle}{\frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x}} \left(\frac{\partial [\langle \bar{u}^2 \rangle]}{\partial x} \right) + [\langle \bar{u}^2 \rangle] - \langle \bar{u}^2 \rangle|_H \right) \right) \end{aligned} \quad (2.39)$$

e normalizando a Equação (2.40) através de $g \langle \bar{H} \rangle$ surge:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho g \langle \bar{H} \rangle} \langle \overline{f_x^s} \rangle = - \frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x} & \left(1 + \left(\frac{1}{g \frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x}} \left(\frac{\partial [\langle \bar{u} \rangle^2]}{\partial x} \right) + \frac{[\langle \bar{u} \rangle^2]}{g \langle \bar{H} \rangle} - \frac{\langle \bar{u} \rangle^2|_H}{\langle \bar{H} \rangle} \right) \right. \\ & + \left(\frac{1}{g \frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x}} \left(\frac{\partial [\langle \bar{u}'^2 \rangle]}{\partial x} \right) + \frac{[\langle \bar{u}'^2 \rangle]}{g \langle \bar{H} \rangle} - \frac{\langle \bar{u}'^2 \rangle|_H}{g \langle \bar{H} \rangle} \right) \\ & \left. + \left(\frac{1}{g \frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x}} \left(\frac{\partial [\langle \bar{u}^2 \rangle]}{\partial x} \right) + \frac{[\langle \bar{u}^2 \rangle]}{g \langle \bar{H} \rangle} - \frac{\langle \bar{u}^2 \rangle|_H}{g \langle \bar{H} \rangle} \right) \right) - \frac{\langle \overline{f_x^{(bv)}} \rangle}{\rho g \langle \bar{H} \rangle} \end{aligned} \quad (2.40)$$

Como já foi referido, $\langle \overline{f_x^s} \rangle$ representa a força de arrastamento exercida nas hastes (*stems* na terminologia inglesa), $\langle \bar{H} \rangle$ é a altura média do escoamento, $\frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x}$ a sua variação e as parcelas identificadas com $|_H$ representam o valor médio no tempo e no espaço da variável à superfície livre. Os parêntesis retos denotam a média em profundidade e $\langle \overline{f_x^{(bv)}} \rangle$ expõe a força viscosa por unidade de área exercida no fundo que será também desprezada juntamente com todas as parcelas relativas à viscosidade.

3

INSTALAÇÕES LABORATORIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Com o objetivo de caracterizar a resistência hidráulica e as tensões turbulentas correspondentes a escoamentos em canais revestidos com vegetação é necessário replicar as condições naturais com um canal, existente no Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, e determinar quantidades instantâneas, particularmente as velocidades instantâneas, recorrendo à técnica do *Laser Doppler Anemometry* (LDA).

O procedimento experimental foi realizado no canal metálico do Laboratório de Hidráulica, cujo circuito hidráulico é composto por um canal prismático suportado por uma estrutura metálica, estruturas de entrada e saída e circuito de recirculação. O sistema de medição *LDA*, usado para medir as várias componentes da velocidade do escoamento através do *software BSA Flow Software*, juntamente com um laser portátil, utilizado para medir distâncias com alta precisão através do *software LabView*, complementam as Instalações Laboratoriais colocadas à disposição para levar a cabo o trabalho experimental.

3.2. INSTALAÇÕES LABORATORIAIS

3.2.1. CANAL PRISMÁTICO

O canal prismático de secção transversal retangular apresenta cerca de 17 m de comprimento, 40 cm de largura e 60 cm de altura. Ao longo de 12 m de comprimento, o canal apresenta painéis de vidro nas laterais do canal, permitindo a visualização e medição do escoamento. O canal possui três apoios que se encontram em contacto direto com o chão, tornando possível a variação da inclinação do canal. No presente estudo foi simulado um canal com inclinação nula. Na Figura 3.1 encontram-se as principais características do canal em questão.

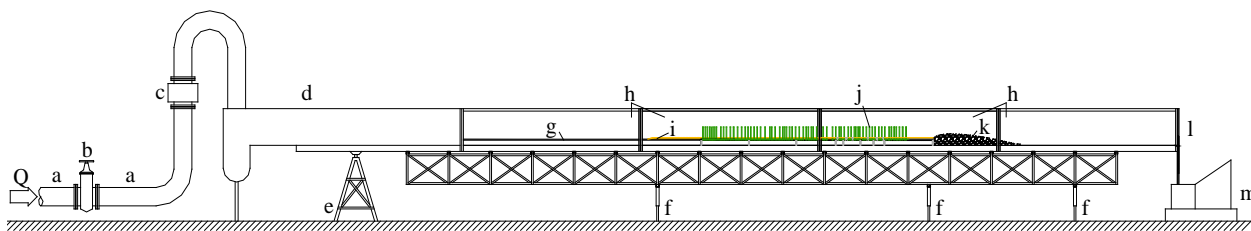


Figura 3.1 - Esquema de parte do circuito hidráulico do canal

O canal é constituído por:

- Conduta de alimentação em FF(\varnothing 250 mm) (a);
- Válvula de regulação do caudal (b);
- Caudalímetro digital (c);
- Estrutura de entrada no canal (d);
- Estrutura metálica de apoio (e);
- Sistema de inclinação variável (f);
- Painéis de vidro (h);
- Soleira a jusante (k);
- Comporta (l);
- Estrutura de saída (m).

Existem ainda vários objetos presentes no canal com a finalidade de cumprir o trabalho laboratorial:

- Fundo falso em placas de acrílico (g);
- Leito rugoso (i);
- Hastes metálicas (j);
- Soleira a jusante (k);

O sistema de recirculação do caudal é feito através de um circuito em pressão ao qual estão ligadas as estruturas de entrada e saída do canal, bem como o reservatório inferior, reservatório de carga constante e as bombas centrífugas (não visíveis na Figura 3.1).

Tomando como base a Figura 3.1 para descrever o percurso da água, irá ser tomado como ponto inicial do sistema de recirculação a posição onde marca a entrada do caudal na Figura 3.1, representada pela letra *Q*.

O canal é abastecido por uma conduta de Ferro Fundido de 250 mm e passa pela válvula de regulação do caudal (ambas presentes na Figura 3.2).



Figura 3.2 – Válvula de Regulação de caudal numa conduta de Ferro Fundido de 250 mm

Iniciado o processo, a água a circular pela conduta, passa pelo caudalímetro (Figura 3.3 a), que regista o caudal instantâneo, sendo que este se encontra ligado a um visor facilitando a sua leitura (Figura 3.3 b).



Figura 3.3 – Caudalímetro (a) e o seu visor (b)

Na Figura 3.3 encontra-se apresentado o caudalímetro eletromagnético de marca *ABB* e modelo *DE41F*. Este apresenta um diâmetro de 200 mm, e apresenta as seguintes condicionantes de medição:

- Temperatura máxima da água: 90° C
- Caudal máximo medido: 1080 m³/h

Após a passagem por este elemento, o escoamento atravessa a estrutura de entrada do canal, marcada com a letra *d* na Figura 3.1, e esta encontra-se apoiada por uma estrutura metálica de apoio (Figura 3.4)



Figura 3.4 – Estrutura metálica de apoio da estrutura de entrada do canal

De seguida, o escoamento entra na zona do canal que apresenta painéis de vidro permitindo a visualização e medição do escoamento. Nesta zona, o fundo do canal apresenta placas de acrílico que foram necessárias para, mais adiante, segurar as hastes metálicas que simularam a vegetação presente. Estão presentes sete placas retangulares de acrílico, com comprimentos diversos, que totalizam um comprimento de 3,5 m, 2 cm de espessura e cada furo atinge 1 cm de profundidade.

Progredindo o escoamento para jusante, foram colocados dois tipos de agregados, caracterizando assim o leito como rugoso. De referir que o primeiro agregado usado foi o mesmo usado para o estudos anterior. Este agregado é um cascalho fino, com 4 a 12 mm de dimensões médias (Figura 3.5).



Figura 3.5 – Cascalho fino (Fernandes, 2012)

Com o intuito de minimizar a influência do leito no escoamento, foi colocado por cima do primeiro agregado, uma areia com 2 a 2,85 mm de dimensões médias, minimizando os espaços vazios existentes, cobrindo-os. Procedeu-se ainda ao alisamento do fundo do canal, numa tentativa de uniformizar o leito e mantê-lo o mais paralelo ao fundo quanto possível. O aspeto final do conjunto dos dois agregados encontra-se na Figura 3.6. A colocação do material e o seu alisamento foi efetuado manualmente.



Figura 3.6 – Material granular constituinte do fundo rugoso

Sensivelmente a partir dos 6 m, do canal, é simulada a vegetação existente em canais naturais. Esta é uma parte vital deste estudo e a simulação de vegetação emersa rígida e foi conseguida através do uso de hastes metálicas. Estas hastes foram fixadas nas placas de acrílico, furadas por máquinas de furação

de controle numérico computadorizado, ao longo de 3,1 m e em toda a largura do leito. Cada haste, cilíndrica e oca, tem cerca de 20 cm de altura, com diâmetro exterior de 1,1 cm.



a)

b)

Figura 3.7 – Haste metálica a) (Fernandes, 2012); Conjunto de hastes vistas de jusante b)

Para melhor compreender o efeito da vegetação nos escoamentos onde esta se encontra presente, as hastes foram dispostas de modo a apresentar várias densidades de hastes (hastes/m^2) ao longo do canal. A disposição das hastes revela a existência de quatro regiões com densidades diferentes, como apresentado na Figura 3.8.

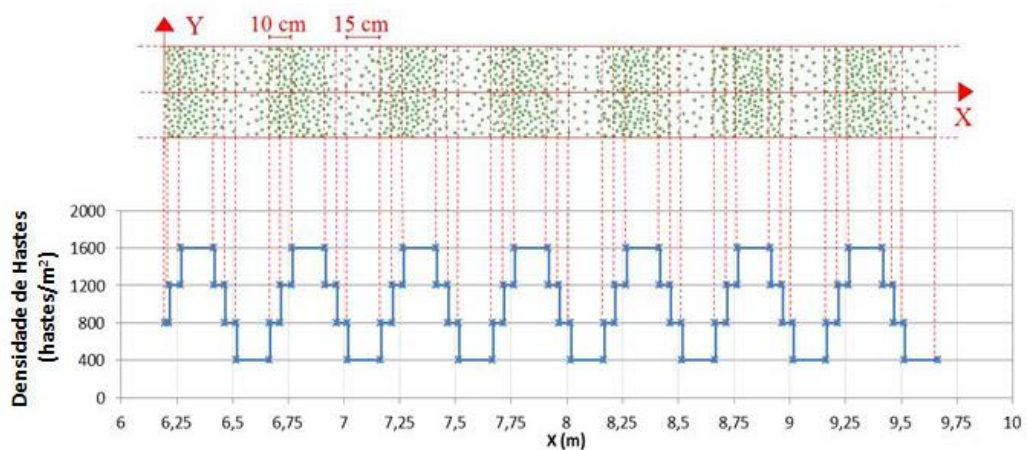


Figura 3.8 – Variação da densidade de hastes no canal

Com o intuito de fixar a altura do escoamento a jusante foi colocado, depois da zona com as hastes, uma soleira espessa permeável (Figura 3.9). O material usado foi seixo rolado com 25 mm de dimensão média.



Figura 3.9 – Soleira a jusante

Na parte jusante do canal a água é conduzida até à estrutura de saída, onde cai, por gravidade, para um tanque de armazenamento através de uma comporta que pode ser usada para regular a altura do escoamento lento no final do canal (Figura 3.10).



Figura 3.10 – Comporta basculante na estrutura de saída

Esta parte do canal possui vários apoios, mostrados na Figura 3.11, que permitem a regulação da inclinação de todo o canal, identificados na Figura 3.1 pela letra *f*.



Figura 3.11 – Sistema de inclinação variável

Após a passagem do escoamento pela comporta, este flui por gravidade para o tanque inferior, fazendo a admissão da água à bomba centrífuga que faz parte deste circuito (Figura 3.12). O laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia possui quatro bombas, sendo que três delas têm capacidade de elevar, no máximo 20 l/s, e a quarta eleva 40 l/s na sua capacidade máxima. No decurso do trabalho laboratorial foi usada uma das primeiras três bombas, uma vez que a quarta bomba não foi usada neste estudo.



Figura 3.12 – Bombas centrífugas

Assim, a água presente no tanque de admissão é elevada e circula numa conduta de 500 mm de diâmetro, para um reservatório com capacidade de armazenamento de cerca de 43 m³ (Figura 3.13). O propósito deste reservatório superior é anular as oscilações de caudal, através da regulação do nível da superfície livre.



Figura 3.13 – Tanque superior de regulação do caudal

Este reservatório abastece o canal através da conduta de Ferro Fundido de 250 mm, que se observa na Figura 3.2, fechando assim o sistema de recirculação existente.

3.2.2. INSTRUMENTAÇÃO

Os vários ensaios realizados consistiram na uniformização da topografia do fundo, medição da altura de escoamento, medição do campo de velocidades e a temperatura da água aquando das medições.

Para cumprir os ensaios pretendidos foi utilizado primeiramente um laser para verificar a variação da altimetria do fundo e, posteriormente, a altura de escoamento (Figura 3.14).



a)

b)

Figura 3.14 – Cabeça do laser (a); e controlador (b)

O sistema usado é constituído pela cabeça do laser, da marca *Keyence* e modelo *LK-501* de alumínio fundido, e por um controlador da mesma marca e modelo *LK-2501* de policarbonato (Figura 3.14).

Para fazer a ligação entre a medição dos dados e o *software* foi feita através de uma placa de aquisição que se liga a um computador via *usb* (*universal serial bus*) (Figura 3.15).



Figura 3.15 – Placa de aquisição de dados e cabo *usb*

Este sistema apresenta dois tipos de medição:

- Medição a longa distância;
- Medição de alta precisão.

O tipo de medição usado foi o de alta precisão. O laser deste sistema apresenta uma luz visível vermelha, com comprimento de onda na ordem dos 690 nm, com o diâmetro mínimo de 0,7 mm à distância de referência. Esta distância ronda os 350 mm com um alcance de medição de ± 100 mm.

Este sistema foi implementado com o intuito de determinar rigorosamente a altimetria de fundo, garantindo que o leito se mantinha plano e sem grandes oscilações no plano de medição. Foi também

usado para caracterizar as oscilações da superfície livre, determinando assim as alturas da superfície livre em cada ponto de medição. Para tal foi apoiado nas laterais do canal, permitindo fixar um ponto específico de medição, como foi o caso para a determinação das oscilações da superfície livre, mas também foi possível deslizar a cabeça do laser de um lado a outro do canal elaborando perfis da altimetria do canal nos vários planos de medição.

Para medir a temperatura da água utilizou-se um termómetro, que era colocado a jusante da soleira de seixo durante uns minutos e retirado para se proceder ao registo da temperatura (Figura 3.16).



Figura 3.16 - Termómetro

A medição do campo de velocidades foi feita através do uso da técnica *LDA* que será descrita brevemente no presente capítulo. Este sistema é constituído por:

- Cabeça do laser – Modelo 177 G da Dantec Dynamics® (Figura 3.17 a);
- Fonte de alimentação;
- Controlador opcional – Modelo 385 F;
- Sonda laser (Figura 3.17 b);
- Foto-detetor (Figura 3.17 a)
- Processador de dados (Figura 3.18 b).



a)



b)

Figura 3.17 – Cabeça do laser (a); Sonda do laser (b)

Na Figura 3.17 encontram-se os constituintes que geram o laser e na Figura 3.18 apresentam-se os equipamentos que recebem o sinal e o seu processamento.

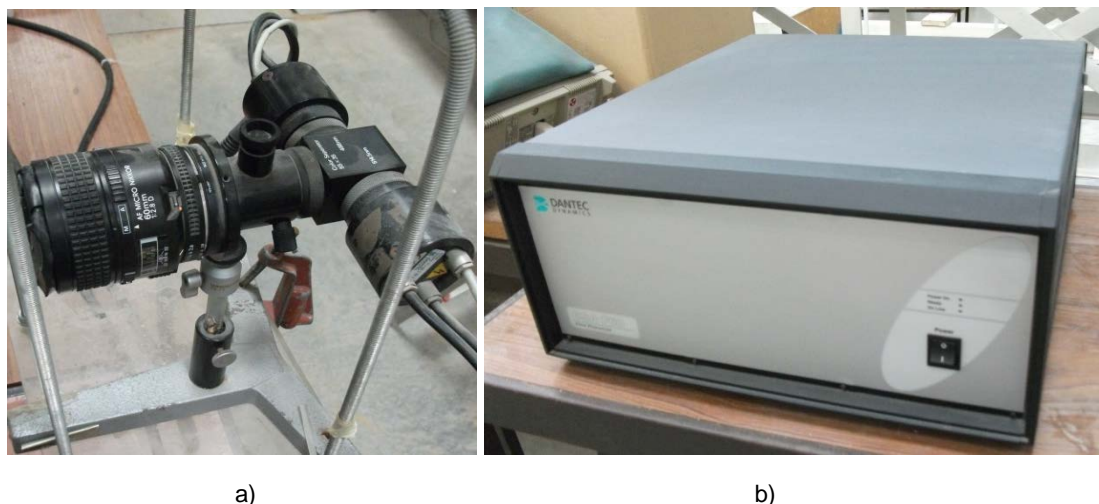


Figura 3.18 – Foto-detetor (a); Processador de dados (b)

Neste ponto importa referir que foram usados dois processadores, por motivo de avaria. Apesar de serem da mesma marca, o primeiro a ser usado funcionava com a medição de duas componentes simultaneamente enquanto que o segundo apenas processava uma componente de cada vez. Irá ser abordado este assunto mais adiante.

3.3. SISTEMA *LASER DOPPLER ANEMOMETRY* (LDA)

O sistema *LDA* é frequentemente utilizado na medição de escoamentos pois esta técnica de medição apresenta elevada resolução espacial e temporal, sendo não intrusiva. Porém, uma das desvantagens verificadas reside no facto deste sistema ser dependente do alcance do laser.

Das vantagens deste sistema destacam-se a capacidade para medir escoamentos com mudança de direção, não necessita de calibração e possui alta resolução espacial e temporal.

No subcapítulo seguinte será feita uma breve abordagem teórica desta técnica, sendo que um estudo mais aprofundado do tema encontra-se descrito na dissertação que precedeu este estudo – Estudo Experimental de Escoamentos em Canais com Vegetação da autoria de Fernandes (2012).

3.3.1. PRINCÍPIO DO *LDA*

O princípio do *LDA* (exemplificado graficamente na Figura 3.23) baseia-se no uso de um laser combinado com o efeito de *Doppler*, sendo que na ótica este é associado com a propagação da luz e regista a variação da frequência quando a fonte de luz se move ou quando a luz é refletida numa superfície em movimento (Zhang, 2010), como é o caso do presente estudo.

Partindo da cabeça do laser (Figura 3.18 b) é emitido um feixe de laser que posteriormente se divide em dois, ou três, permitindo a medição segundo várias componentes simultaneamente. No caso em análise foi usada esta técnica com medição com duas componentes, ou seja, com dois feixes distintos, um azul e um verde com 488 nm e 514,5 nm de comprimento de onda, respetivamente.

Após a passagem dos feixes pela cabeça do laser, estes encaminham-se para a sonda do laser (Figura 3.18 c) e dividem-se novamente em dois, resultando quatro feixes de laser, dois para cada

componente. Os feixes passam por uma lente convexa, sendo focados num ponto (ponto de medição) (Figura 3.19), formando um volume de controlo com milímetros de comprimento.

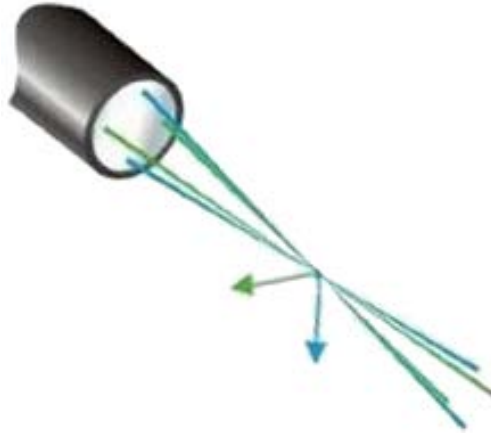


Figura 3.19 – Pares de feixes emitidos para medição de duas componentes (Dantec Dynamics)

O volume de medição é o princípio fundamental do sistema LDA sendo que determina a qualidade das medições do escoamento. A passagem de partículas presentes no escoamento no volume de controlo interfere os raios laser, dispersando a luz e alterando a sua frequência, pelo efeito de Doppler.

No caso exemplificado na Figura 3.20 é efetuada a medição de apenas uma componente, ou seja são emitidos dois feixes (A e B) com igual frequência, ν_0 , com direções \vec{l}_{1a} e \vec{l}_{1b} . Na direção da luz dispersa pelas partículas encontra-se um detetor que recebe as frequências das ondas dos feixes luminosos, \vec{l}_2 .

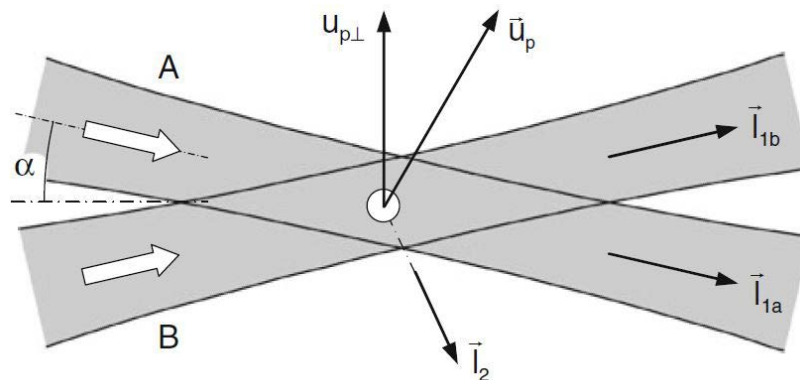


Figura 3.20 – Movimento de uma partícula através do volume de medição (Zhang, 2010)

As frequências recebidas pelo detetor são, como referido anteriormente, diferente das emitidas e podem ser determinadas por (Zhang, 2010):

$$v_{2a} \approx v_0 \left(1 - \frac{\vec{u}_p \cdot \vec{l}_{1a}}{c} + \frac{\vec{u}_p \cdot \vec{l}_2}{c} \right) \quad (3.1)$$

e

$$v_{2b} \approx v_0 \left(1 - \frac{\vec{u}_p \cdot \vec{l}_{1b}}{c} + \frac{\vec{u}_p \cdot \vec{l}_2}{c} \right) \quad (3.2)$$

Quando recebidos pelo foto detetor, as ondas dos dois feixes são sobrepostas, sendo que a densidade fluxo da onda resultante apresenta uma frequência baixa, denominada de frequência de *Doppler*, e pode ser calculada por:

$$v_D = |v_{2a} - v_{2b}| = \frac{v_0}{c} |\vec{u}_p \cdot (\vec{l}_{1b} - \vec{l}_{1a})| = 2 \frac{u_{p\perp}}{\lambda_0} \sin \alpha \quad (3.3)$$

sendo que c , λ_0 e $u_{p\perp}$ representam a velocidade da luz no vácuo, o comprimento de onda e a componente da velocidade da partícula perpendicular à bissetriz dos dois feixes luminosos, respetivamente.

Assumindo que a velocidade das partículas do escoamento é igual à velocidade do mesmo então esta pode ser obtida através da frequência de *Doppler* medida (Zhang, 2010):

$$u_{p\perp} = \frac{\lambda_0}{2 \sin \alpha} v_D \quad (3.4)$$

Porém, a frequência de *Doppler* não depende da direção do escoamento fazendo com que os seus valores sejam positivos seja qual for a sua direção. Para remover esta ambiguidade, é alterada a frequência de um dos feixes de cada componente do lasers para um valor conhecido (v_{sh}), criando fronteiras que se deslocam no volume de medição numa direção pré-definida, fazendo com que as frequências recebidas sejam determinadas a partir das seguintes equações (Zhang, 2010):

$$v_{2a} \approx (v_0 + v_{sh}) \left(1 - \frac{\vec{u}_p \cdot \vec{l}_{1a}}{c} + \frac{\vec{u}_p \cdot \vec{l}_2}{c} \right) \quad (3.5)$$

e

$$v_{2b} \approx v_0 \left(1 - \frac{\vec{u}_p \cdot \vec{l}_{1b}}{c} + \frac{\vec{u}_p \cdot \vec{l}_2}{c} \right) \quad (3.6)$$

Na Figura 3.21 é possível verificar a alteração introduzida através da alteração de frequência (“*frequency shift*” na literatura inglesa), sendo que a cor vermelha indica o caso onde não se procede à alteração da frequência ao contrário do gráfico roxo.

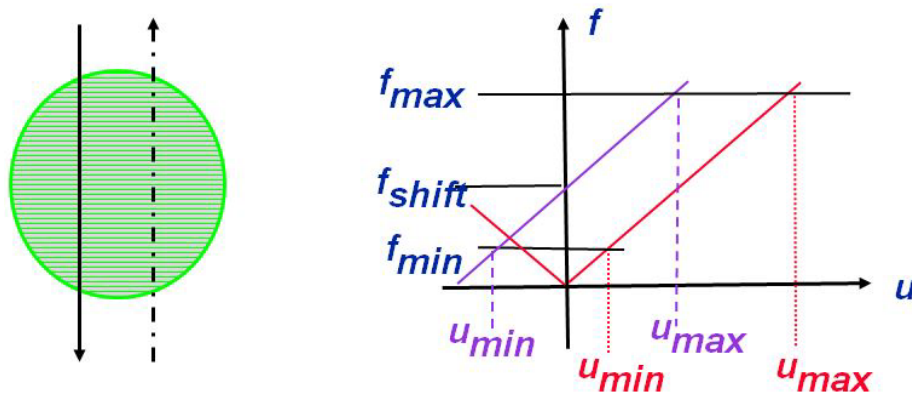


Figura 3.21 – Remoção da ambiguidade direcional com a alteração da frequência (Dantec Dynamics)

Após retirada a ambiguidade direcional do sistema *LDA* e passando a medir a velocidade de escoamento verifica-se a existência de planos de alta intensidade de luz, denominados de franjas (Figura 3.22).

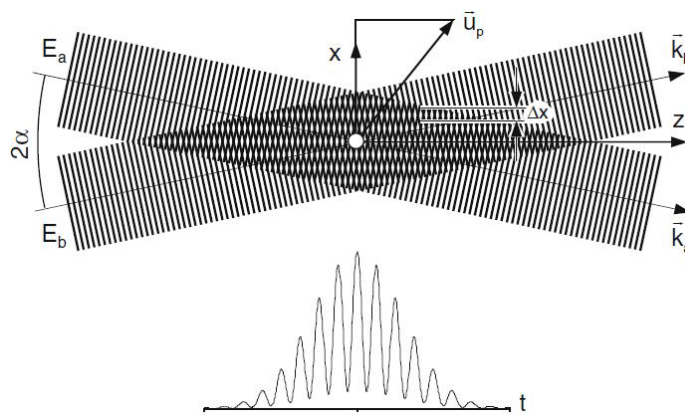


Figura 3.22 – Modelo das franjas do princípio do *LDA* e sinal “*Doppler Burst*” (Zhang, 2010)

Visto que os dois raios laser, de cada componente, apresentam o mesmo comprimento de onda, então os números de onda são iguais ($\vec{k}_a = \vec{k}_b$) para cada direção (direção *a* e *b*). Os planos de alta

intensidade de luz referidos anteriormente alteram-se com a distância, Δx , denominada como o espaçamento fronteira do volume de medição (Zhang, 2010):

$$\Delta_x = \frac{\lambda_0}{2 \sin \alpha} \quad (3.7)$$

A velocidade das partículas que atravessam o volume de medição podem ser determinadas por:

$$u_x = \Delta_x \cdot (v_M - v_{sh}) \quad (3.8)$$

Assim, comparando a frequência v_M (detetada pelo foto detetor) e v_{sh} é possível obter o valor e sinal da componente u_x . O sinal de luz, no âmbito das medições com *LDA*, é denominado por “*Doppler Burst*” e encontra-se representado na Figura 3.22, juntamente com a interseção e interferência de dois feixes de laser (Zhang, 2010).

Na prática, o processamento do sinal baseia-se na conversão das flutuações de intensidade de luz num sinal elétrico, *Doppler burst*. Este é gaussiano devido ao perfil de intensidade dos feixes do laser que possuem uma distribuição gaussiana. De seguida, as explosões são filtradas e ampliadas no processador de sinal que determina a frequência de *Doppler* de cada partícula. O espaçamento entre franjas fornece informações sobre a distância percorrida pelas partículas e a frequência de *Doppler* fornece informação sobre o tempo. A partir destas informações retira-se o valor da velocidade.

Na Figura 3.23 encontra-se exemplificado o princípio do *LDA*.

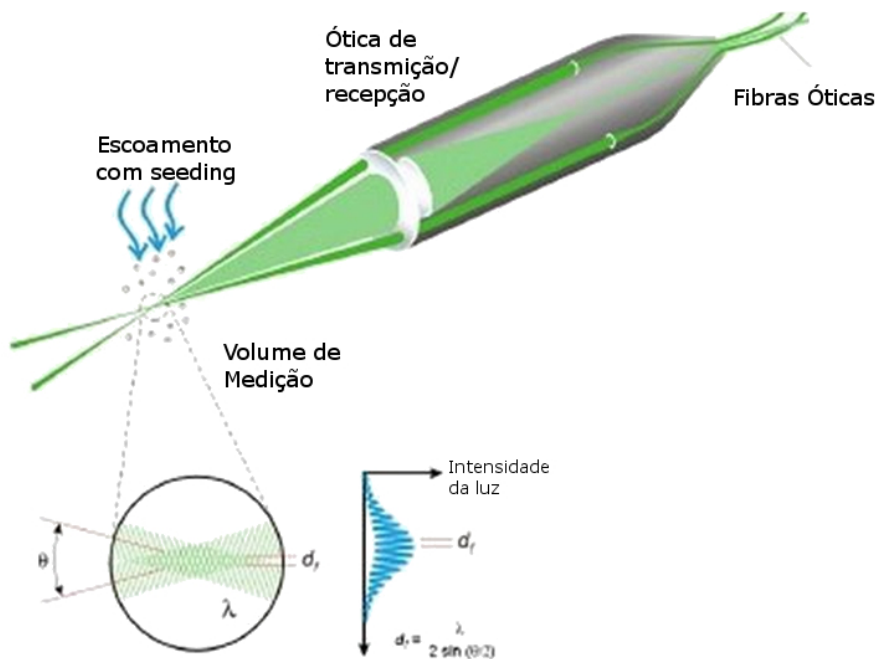


Figura 3.23 – Princípio do *LDA* (adaptado de Dantec Dynamics)

3.4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Após ser introduzida a vertente teórica do presente estudo, este subcapítulo apresenta as condições em que foi realizado o trabalho laboratorial, descrevendo os procedimentos usados na preparação e realização dos ensaios.

O trabalho foi dividido em duas fases. A primeira consistiu em colocar o agregado, como referido no subcapítulo 3.2, medindo a altimetria de fundo e colmatando eventuais desníveis, e também as oscilações da superfície livre, caracterizando assim a altura do escoamento para os futuros pontos de medição.

A segunda fase baseou-se na medição dos perfis de velocidade recorrendo à técnica do *LDA*. Nesta fase foram realizados ensaios entre as hastes e fora destas.

3.4.1. FASE I - ALTIMETRIA DE FUNDO E OSCILAÇÕES DA SUPERFÍCIE LIVRE

O propósito desta fase é preparar a instalação laboratorial para as medições dos perfis de velocidade e recolher dados para a futura análise das tensões e das funções de vazios em cada trincheira.

Inicialmente procedeu-se ao estudo da altimetria de fundo, que consistiu na colocação dos agregados, no espalhamento (como já foi referido no subcapítulo 3.2.1 e exemplificado pela passagem da Figura 3.5 para a Figura 3.6) e uniformização manual do leito. Esta etapa foi executada ao longo de todo o canal, dando ênfase às trincheiras (planos) onde posteriormente se irá medir os perfis de velocidade.

Uma das diferenças entre o trabalho realizado por Fernandes (2012), para o presente, prende-se com o facto de todo o fundo do canal teve de ser alteado devido à presença de placas de acrílico em seis dos sete planos de medição existentes entre a vegetação simulada. Uma vez que teve de se cobrir essas seis placas de acrílico, foi necessário cobrir o resto do canal para não existirem “lombas” nas zonas de medição.

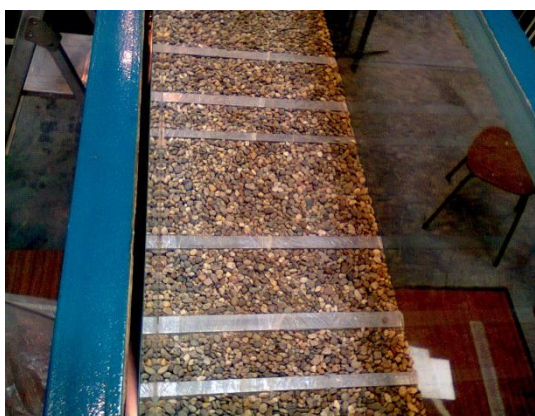


Figura 3.24 – Canal sem presença de vegetação (Fernandes, 2012)

A tarefa de cobrir o canal com os agregados verificou-se complexa, uma vez que as hastes metálicas já estavam colocadas dificultando assim a tarefa de alisar o fundo.

O cuidado especial dado nas trincheiras foi executado com o auxílio do laser portátil e do *software LabView*. Para tal foi colocado o laser, por cima do canal, apoiado nas laterais do mesmo permitindo o deslizamento ao longo da sua largura (Figura 3.25), obtendo um perfil transversal do leito no ponto de

medição. O critério de validação destes ensaios era definido através da variação da altura do fundo. À medida que se iam fazendo ensaios, averiguava-se se a variação da altura do leito era inferior a 0,5 cm. Caso tal não se verificasse, seria procedido ao alisamento do canal e realização de novo ensaio.

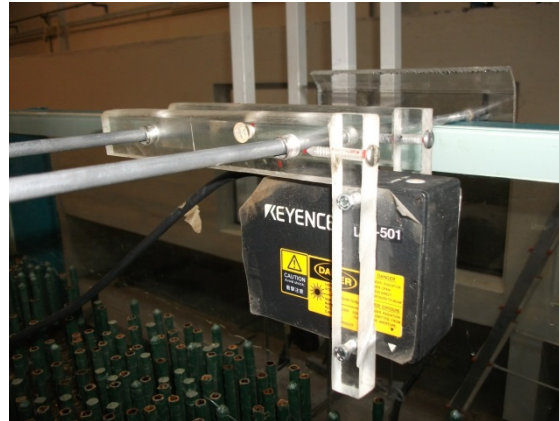


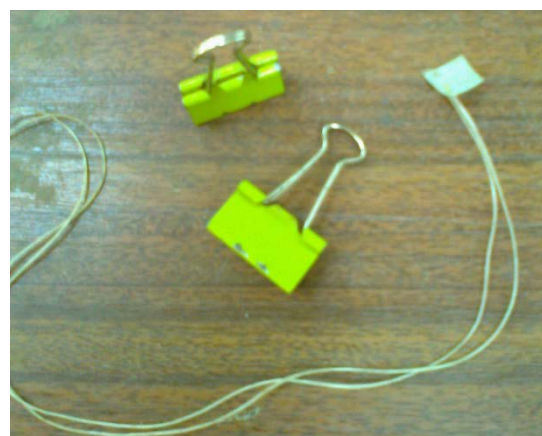
Figura 3.25 – Laser portátil montado no sistema de apoio

A medição das oscilações da superfície livre é feita de maneira análoga. Ao longo da largura do canal o laser é fixo num alvo que se encontra preso por um fio às hastes com o auxílio de duas molas (Figura 3.26), durante três minutos.

Ao contrário do ensaio da altimetria de fundo, este já é efetuado com água a correr no canal. Foi estabelecido o caudal de todos os ensaios idêntico ao do estudo do Pedro Fernandes, em 2012, visto que este trabalho é uma sequência do seu. Este valor foi definido com o intuito de reproduzir as condições dos ensaios realizados no Instituto Superior Técnico (IST) de Lisboa (Ricardo, 2008). O caudal varia com o tempo, devido à impossibilidade de fixar um valor, e ronda os 2 l/s, podendo por vezes descer a 1,9 l/s e outras vezes ser superior a 2 l/s.



a)



b)

Figura 3.26 – Vista de cima do ensaio de medição da superfície livre do escoamento (a); Dispositivo para a medição da superfície livre (b)

Este processo repete-se nove vezes, com pontos fixos no alvo apresentando 4 cm de espaçamento entre si, em cada plano de medição (Figura 3.27).

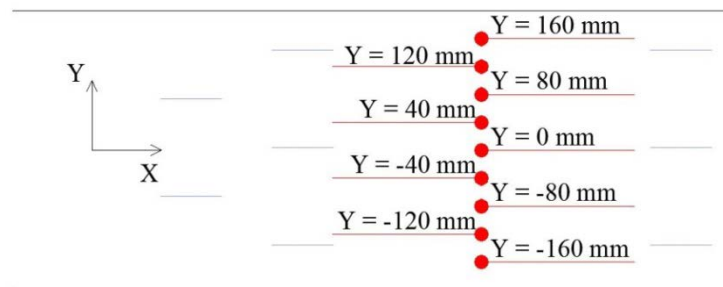


Figura 3.27 – Pontos de medição transversais no ensaio de oscilações da superfície livre

Previamente a estes ensaios o laser necessitou de calibração. Tal foi feito antes do início deste trabalho e consistiu em calibrar o eixo vertical tendo como valor nulo na placa de acrílico, a montante dos agregados. Com esta calibração é possível medir a espessura do leito e do conjunto do agregado e água.

Nos dois ensaios o *software* usado foi o *LabView*, variando apenas os pontos de aquisição, passíveis de se converter em tempo, sendo que o processo de aquisição de dados é bastante simples. A janela do *software* encontra-se ilustrada na Figura 3.28.

Foi criada uma rotina em *LabView* para proceder à aquisição do sinal analógico obtido do laser de varrimento e convertê-lo, através da placa de aquisição de dados para um sinal digital.

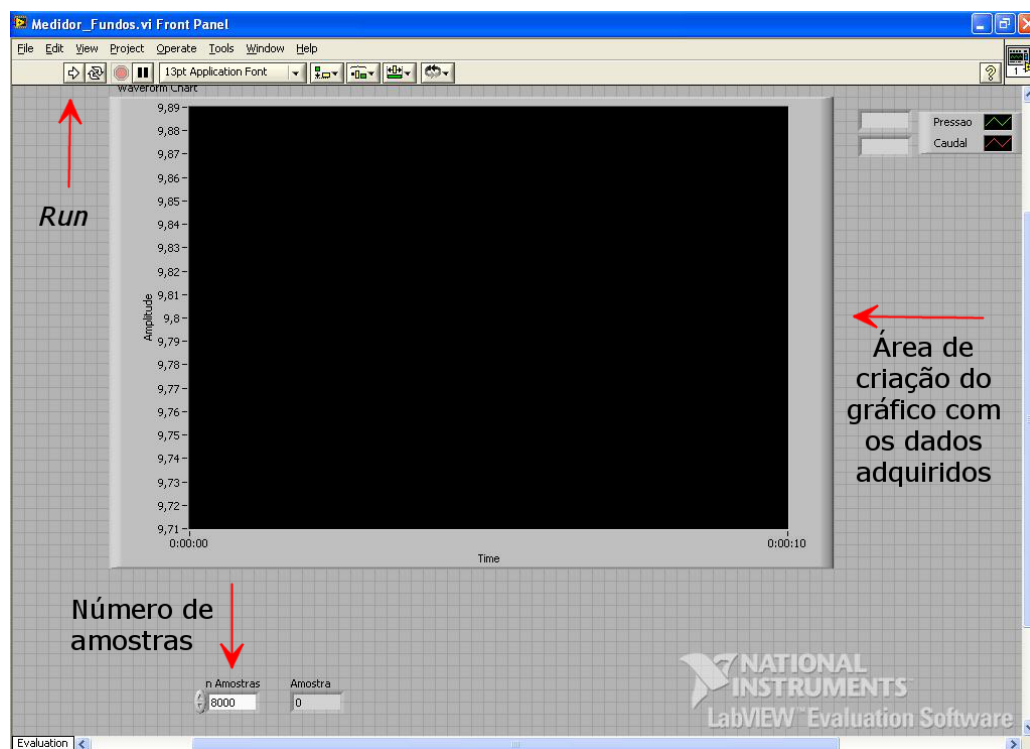


Figura 3.28 – Janela de captura de dados no LabView

No caso do primeiro tipo de ensaios o *software* é configurado para recolher mil pontos que, em tempo de aquisição se traduzem em sensivelmente 20 segundos. A quantidade de pontos de aquisição foi definida com base no tempo que demora a fazer deslizar o laser de um lado ao outro do canal, caracterizando devidamente a altimetria de fundo. No segundo tipo de ensaio o laser é fixo num alvo (Figura 3.26 b) durante 3 minutos, traduzindo-se em 8000 pontos capturados.

3.4.2. FASE II – MEDIÇÃO DOS CAMPOS DE VELOCIDADE

Após a primeira fase se encontrar concluída com resultados satisfatórios, procedeu-se à fase seguinte que consistia na medição dos campos de velocidades, através do sistema *LDA*, nos planos de medição previamente estabelecidos. Nesta fase foram medidas a componente longitudinal e vertical do escoamento.

3.4.2.1. Zonas de Medição

Cada zona de medição encontra-se caracterizada segundo os eixos *X*, *Y* e *Z*. As direções destes eixos são: longitudinal, transversal e vertical respetivamente. Em resumo, foram usados sete planos longitudinais de medição entre hastes e um fora destas, que se consideram ser representativos das regiões que se pretendem estudar. Em cada uma destas zonas existem seis planos verticais, e trinta e um planos transversalmente ao escoamento.

O referencial do canal encontra-se ilustrado na Figura 3.29, sendo que a direção transversal tem o seu ponto 0 a meio do canal, e a direção vertical na base da placa de fundo.

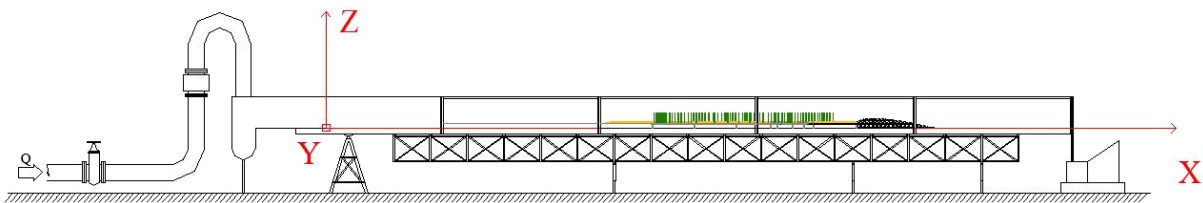


Figura 3.29 – Sistema do referencial de coordenadas *X*, *Y* e *Z*

- Zonas de Medição Longitudinais

Como se pode verificar na Figura 3.30, foram usadas sete zonas de medição dentro da vegetação. A estas zonas acrescenta-se uma, a montante das hastes, a $X=5,976$ m.

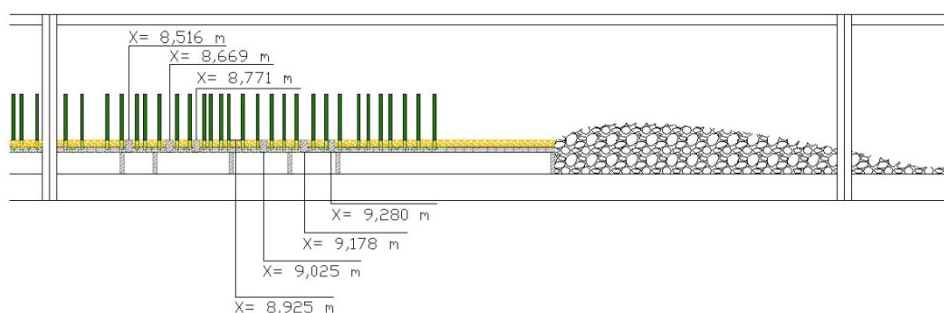


Figura 3.30 – Perfil longitudinal com pormenor das zonas de medição segundo o eixo dos *XX*

Como foi referido anteriormente, foi simulada a existência de vegetação emersa rígida com várias densidades (hastes/m²). Assim as zonas de medição escolhidas inseriam-se em regiões com várias densidades, como se pode verificar na Tabela 3.1. Visto que é nestes pontos se pretende medir os perfis de velocidade, a caracterização da altimetria do fundo e as oscilações de superfície livre foram também determinadas ao longo destes planos longitudinais.

De referir que várias zonas de medição foram também usadas no trabalho que precedeu o atual (Fernandes, 2012) com a exceção da zona $X=8,925$ m. Os ensaios referidos na Fase I também foram aplicados nas zonas referidas na tabela seguinte.

Tabela 3.1 – Zonas de medição e respetivas densidades de hastes

Zona de Medição (m)		Densidade de hastes (hastes/m ²)
P ₀	X = 5,976	0
P ₁	X = 8,516	800
P ₂	X = 8,669	400
P ₃	X = 8,771	1200
P ₄	X = 8,925	1600
P ₅	X = 9,025	800
P ₆	X = 9,178	400
P ₇	X = 9,280	1200

- Planos de Medição Verticais

Os pontos de medição, na direção vertical, são diferentes em cada uma das fases.

Nesta fase, e em cada zona de medição descrita na

Tabela 3.1, foram medidos seis planos verticais. A definição desses planos foi estabelecida consoante a altura do escoamento, isto é, as alturas de medição foram determinadas através de percentagens da altura de água. Este facto torna possível fazer uma analogia entre perfis, ao longo do canal, com alturas de água diferentes.

Inicialmente, os perfis verticais apresentavam a seguinte malha:

- 5 %
- 12 %
- 25 %
- 40 %
- 60 %
- 75 %

Posteriormente foi definido que os dois primeiros perfis verticais adotassem sempre a mesma altura, para se poder descrever melhor as características do escoamento junto ao leito, ficando a malha com a seguinte configuração:

- 3 mm

- 7 mm
- 25 %
- 40 %
- 60 %
- 75 %

Na Figura 3.31 encontra-se um esquema que ilustra a malha de pontos verticais, para o caso de $X = 9,025$ m.

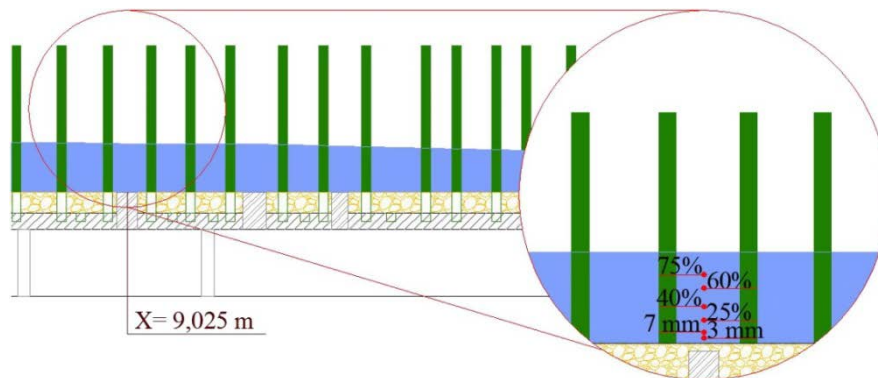


Figura 3.31 – Exemplo da malha de pontos verticais no ponto $X = 9,025$ m

• Zonas de Medição Transversais

Para todas as secções longitudinais foram definidas trinta e uma posições transversais (segundo a direção Y) com o objetivo de cobrir e caracterizar o escoamento ao longo da sua largura, na zona central do escoamento. Foi portanto elaborada uma malha densa no centro do canal, com medições pontuais a cada 10 mm sendo que não foram efetuadas medições à distância de 5 cm junto a cada uma das paredes de vidro laterais.

Para a determinação da posição transversal, o fenómeno da refração teve de ser acautelado, uma vez que existe a passagem dos feixes de laser de um ambiente para outro (ar para água). Esse fenómeno influencia todos os pontos medidos no canal, positivos e negativos, e implica que as distâncias movimentadas no sistema de apoio do laser sejam diferentes àquelas que o ponto de interseção dos feixes de laser sofre dentro do escoamento. Para tal, seria necessário afetar as distâncias presentes na Figura 3.33 pelo coeficiente de refração da água, valor esse aproximadamente igual a 1,33.

A Figura 3.32 exemplifica o fenómeno da refração, exemplificando para o ponto $Y=10$ mm.

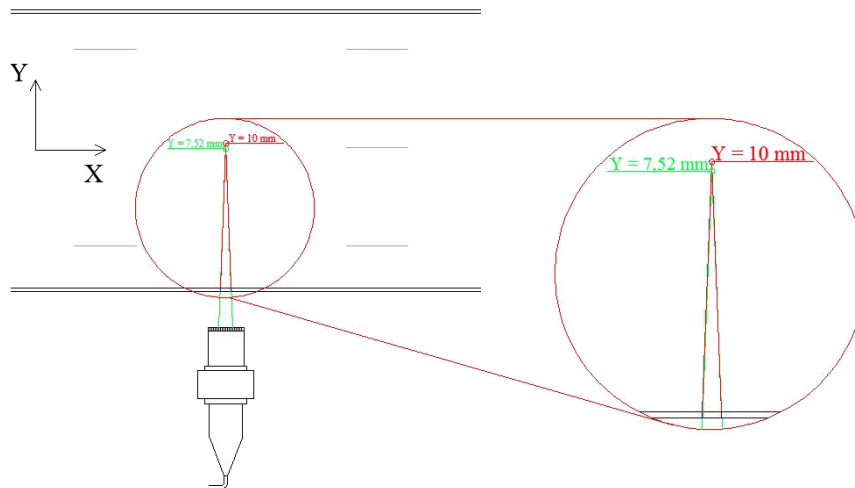


Figura 3.32 – Exemplo da influência da refração no ponto $Y=10\text{ mm}$ (a linha a verde não apresenta refração e a linha a vermelho apresenta a refração resultante da mudança entre o meio ar-água)

Os feixes de laser também atravessam a parede de vidro, onde também são refratados com um índice de refração de 1,5. No entanto, à saída do vidro, os feixes voltam a orientar-se com a mesma direção antes de atingir o vidro. Portanto a refração existente nesta passagem é anulada. Uma vez na água o par de feixes sofre a refração e consequente mudança de direção (mudança da direção da linha a verde para a orientação da linha a vermelho). Verifica-se portanto que, caso não existisse refração, o ponto de união dos feixes seria ligeiramente diferente.

A Tabela 3.2 apresenta a conversão entre os perfis medidos na água e no ar. De referir que para o ponto de interseção dos feixes de laser se movimentar 10 mm dentro da água seria necessário movimentar o sistema de suporte segundo a relação:

$$\frac{10\text{mm}}{1,33} = 7,5\text{mm} \quad (3.9)$$

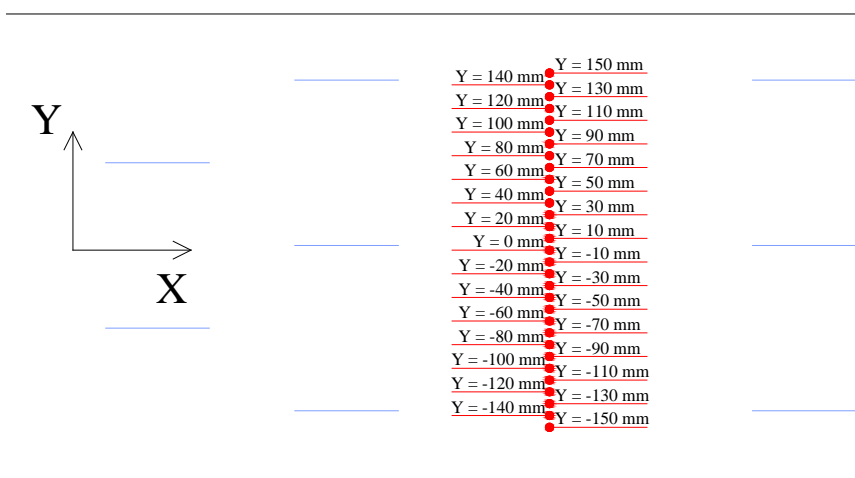


Figura 3.33 - Zonas de medição segundo o eixo dos YY

Como o objetivo passa por caracterizar a parte central do canal com medições a cada 10 mm, seria necessário afetar as distâncias presentes na Figura 3.33 do coeficiente de refração (Tabela 3.2), ou seja, os valores presentes nas colunas $Y_{\text{Água}}$ referem-se às posições do volume de controle após acautelar o fenómeno da refração, e as colunas Y_{Ar} referem-se às posições do volume de controle caso não houvesse refração.

Tabela 3.2 – Zonas de medição transversal no ar e na água

Y_{Ar} (mm)	$Y_{\text{Água}}$ (mm)	Y_{Ar} (mm)	$Y_{\text{Água}}$ (mm)
-112,782	-150	0,000	0
-105,263	-140	7,519	10
-97,744	-130	15,038	20
-90,226	-120	22,556	30
-82,707	-110	30,075	40
-75,188	-100	37,594	50
-67,669	-90	45,113	60
-60,150	-80	52,632	70
-52,632	-70	60,150	80
-45,113	-60	67,669	90
-37,594	-50	75,188	100
-30,075	-40	82,707	110
-22,556	-30	90,226	120
-15,038	-20	97,744	130
-7,519	-10	105,263	140
		112,782	150

3.4.2.2. Ensaios de medição dos campos de velocidade

Como referido anteriormente foi usado o *software BSA Flow Software* de forma a obter os valores das velocidades em cada ponto de medição. Foram ainda efetuados dois tipos de ensaios, consoante o tipo de processador de dados usado.

Os primeiros ensaios foram realizados com o processador de aquisição de duas componentes simultâneas sendo que as posições sendo que esses pontos foram:

- $X=8,516$ m
- $X=8,669$ m
- $X=8,771$ m
- $X=9,025$ m

As restantes quatro posições foram portanto medidas com o processador de uma componente, sendo que a análise dos dados nestes casos não foi exatamente igual aos anteriores, visto que as duas componentes foram adquiridas separadamente.

Antes de dar início aos trabalhos laboratoriais, foi necessário calibrar os ficheiros de aquisição de dados de forma a conseguir o melhor sinal possível.

Na Figura 3.35 apresenta-se a janela do programa de aquisição de dados de uma componente, em execução, com os dados configurados na janela das propriedades que se encontra identificada pela seta vermelha. Estas configurações foram mantidas desde o trabalho de Pedro Fernandes em 2012.

Em todos os ensaios efetuados, foi configurado no programa duas condições de paragem de aquisição de dados:

- 180 segundos de aquisição de dados;
- Obtenção de 200 000 amostras.

Ao longo do trabalho experimental houve sempre o cuidado de manter sempre o mesmo *Data Rate*, variando o nível de alta voltagem do fotomultiplicador.

Na Figura 3.34 apresenta-se a janela do programa com alguns dos pontos essenciais do seu manuseamento. Após a realização de cada ensaio, o *BSA Flow Software* cria ficheiros de texto e exporta-os para uma pasta definida pelo utilizador, com todos os dados do ensaio além de um breve resumo dentro do programa.

O processo de utilização do programa para cada ensaio segue a seguinte ordem, devidamente identificada na Figura 3.34:

- Depois de abrir o programa, é necessário definir as posições longitudinais, transversais e verticais (é possível ver as posições verticais definidas na Figura 3.34 com a seta roxa);
- Definir para que pasta e sob que nomes os ficheiros dos dados adquiridos serão exportados (é possível identificar o atalho para definir a exportação dos dados com a seta azul, indicando o menu *Export*);
- Definição das propriedades da aquisição dos dados (assinalada com a seta amarela), com especial ênfase no nível de voltagem (seta verde) visto que esta influencia o *Data Rate* dos ensaios (frequência de aquisição de dados assinalada com a seta laranja);
- Após verificar que o *Data Rate* se mantém nos 1000 Hz sensivelmente (valor estipulado para a aquisição de dados), encontram-se reunidas as condições para dar início ao ensaio com a tecla *Run* (assinalada com a seta vermelha).

Na Figura 3.34 encontra-se exemplificado o caso de uma componente, mas nos casos onde se meçam duas, ou mais componentes, todas os passos referidos anteriormente devem ser realizados, sendo que o nível de voltagem para cada componente é definido independentemente, sendo que o *Data Rate* verificado nestes casos é comum para as componentes em medição obtendo assim o mesmo número de dados para cada uma.

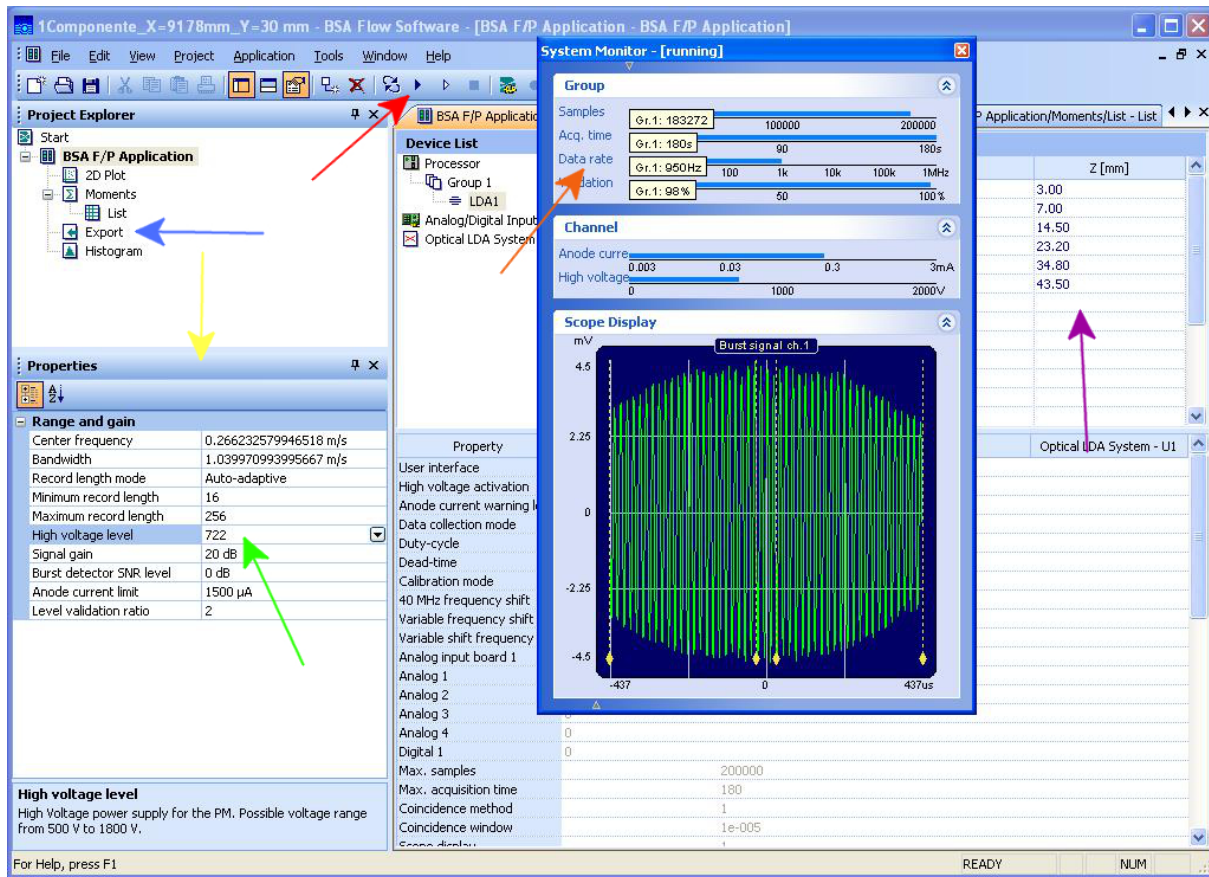


Figura 3.34 – Janela do BSA Flow Software

Uma vez iniciada aquisição de dados, aparece um aviso a verde no monitor do computador que identifica que se está a proceder a um ensaio tal como aparece na Figura 3.35 através do aviso *Running* no canto inferior direito.

Caso se verifique a necessidade de abortar o ensaio basta carregar no botão *Stop* identificado com a seta vermelha na Figura 3.35. À medida que o ensaio decorre, são apresentadas na janela *System Monitor* o tempo de aquisição e a quantidade de dados recolhida (identificados com a elipse a amarelo na figura seguinte), sendo que o ensaio acaba quando um destes critérios se cumprir.

Durante o ensaio é ainda possível identificar a posição de medição transversal e vertical, identificada com a seta azul, e os *bursts* referidos na parte teórica deste capítulo. Apesar de se encontrar tapada, a posição longitudinal também se encontra gravada.

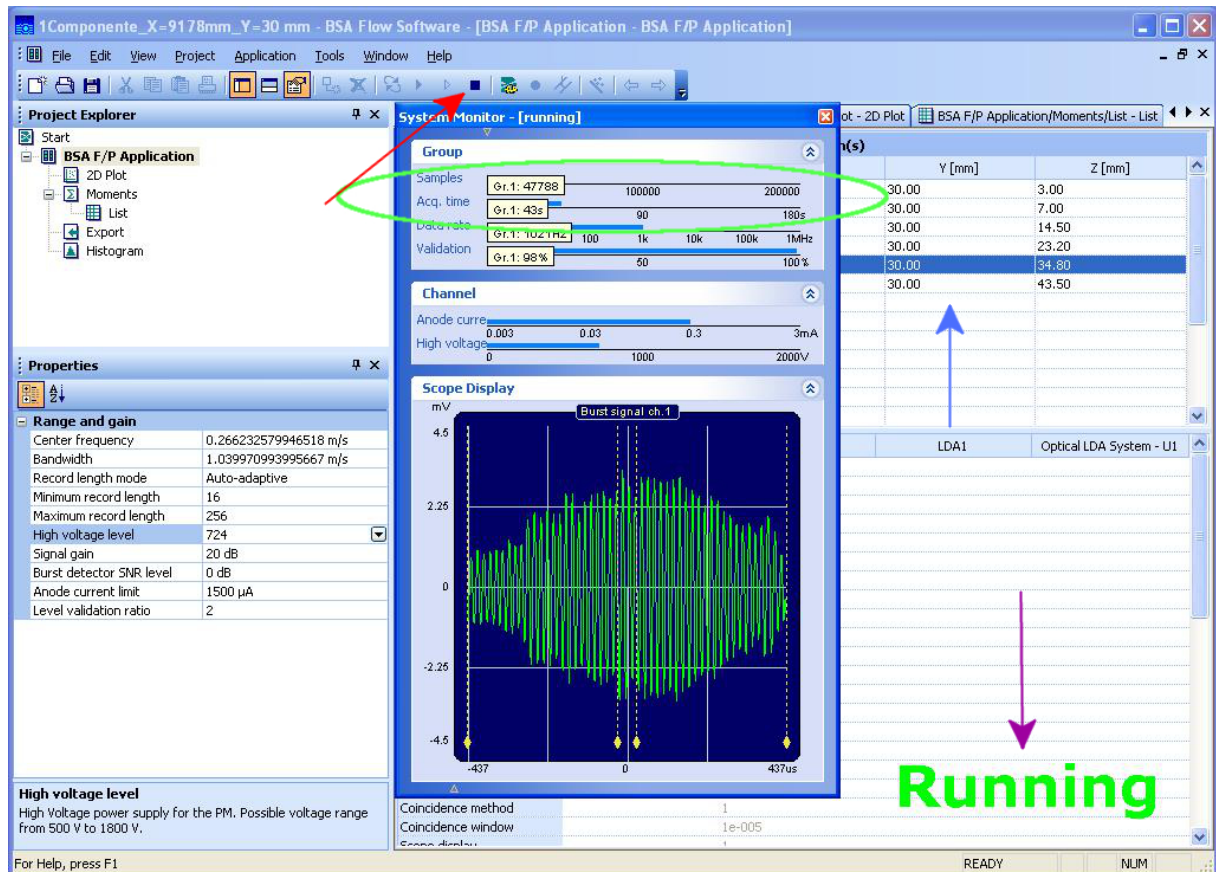


Figura 3.35 – Janela do BSA Flow Software com aquisição de uma componente

No final de cada ensaio, o programa apresenta um ligeiro resumo na aba indicada com a seta amarela da Figura 3.35 e exporta os dados em bruto num ficheiro de texto com todos os dados adquiridos.

Mais detalhadamente o resumo encontra-se na Figura 3.36. Nesta aba é apresentada a posição onde se está a proceder o ensaio, a hora a que decorreu, o número de amostras, o *Data Rate* (Hz), validação das aquisições e a média dos valores adquiridos no ensaio.

	Y [mm]	Z [mm]	Date_Time	Count(1)	Data Rate(1) [Hz]	Validation(1) [%]	LDA1-Mean [m/s]	LDA1-RMS [m/s]	LDA1-
1	40.00	46.00	18:44:25	21250	1364.8649815	97.39	0.0872505435665719	0.033807529134985	0.0

Figura 3.36 – Resumo de cada ensaio no BSA Flow Software

Os ficheiros exportados têm o formato apresentado nas Figura 3.37 e Figura 3.38. A primeira figura refere-se a ensaios com a aquisição das duas componentes do escoamento simultaneamente, e a segunda de apenas uma.

"Row#"	"AT [ms]"	"TT [us]"	"LDA1 [m/s]"	"LDA2 [m/s]"
1	0.5563733333333333	491.5199824609	0.126528521070316	0.002953829331435
2	1.8670933333333333	191.1466679303	0.122164629470610	0.001222922969977
3	2.4678400000000000	204.8000023933	0.130872583889825	-0.008334690964461
4	3.3416533333333333	122.8799956152	0.114805526090975	0.003461812722915
5	4.6523733333333333	163.8399990043	0.069321866220928	0.000000000000000
6	4.8708266666666666	95.5733339651	0.075173453653713	-0.009068444951949
7	5.3350400000000000	163.8399990043	0.104332186251681	-0.002822130009755
8	5.5261866666666667	150.1866645413	0.068310238774275	-0.023047395422167
9	5.7446400000000000	81.9199995021	0.085944329193053	0.001279365683198
10	6.4546133333333333	122.8799956152	0.094533258932540	-0.003687583318922
11	7.3557333333333333	764.5866717212	0.122541514957142	-0.001147666233080
12	7.8472533333333334	109.2266684282	0.077752113720294	0.008409947572920
13	8.0110933333333333	150.1866645413	0.090823951072790	-0.006754298076798
14	8.6937599999999999	1064.9600299075	0.108180338904931	-0.009614055877029
15	9.8133333333333334	129.7066628467	0.045737014135896	-0.010893422330857
16	11.0967466666666668	873.8133474253	0.110243268691480	-0.007074139176502
17	11.6428800000000002	505.1733460277	0.092093452325884	-0.007074139176502
18	11.8613333333333334	81.9199995021	0.060157693861546	-0.016612938958825
19	13.4724266666666667	109.2266684282	0.107565430058218	-0.003875725353822
20	14.4008533333333334	1037.6533027738	0.116590748957675	-0.009444729021750
21	15.6842666666666669	614.4000217319	0.117443689830995	-0.005775959598066
22	16.1757866666666667	464.2133426387	0.083603692486654	-0.005775959598066
23	16.5034666666666668	191.1466679303	0.094711787285707	-0.010931050635086
24	16.8857600000000001	218.4533368563	0.089911506526031	-0.004346080441074
25	17.1042133333333334	197.9733351618	0.101098933778720	-0.004346080441074

Figura 3.37 – Exemplo do formato de armazenamento dos valores de velocidade medidos com o processador de duas componentes

Os dados usados presentes em cada formato de texto são as colunas *LDA1* e *LDA2*. A primeira diz respeito às velocidades instantâneas da componente longitudinal e a segunda à vertical.

"Row#"	"AT [ms]"	"TT [us]"	"LDA1 [m/s]"
1	10.0864000000000001	54.6133342141	0.054623483908641
2	13.6362666666666668	68.2666650391	0.032506488043460
3	14.9469866666666668	95.5733339651	-0.026445725612416
4	15.3019733333333335	95.5733339651	0.047720602802385
5	15.5750400000000001	409.6000047866	0.022072818764197
6	16.6673066666666665	81.9199995021	0.074856071840621
7	17.5684266666666667	218.4533368563	0.018244494891144
8	17.7322666666666668	68.2666650391	0.035878587476528
9	18.1145600000000001	68.2666650391	0.080906016406770
10	18.3603199999999998	177.4933334673	0.034152866116661
11	19.6710400000000001	273.0666601565	0.095782922739012
12	20.1898666666666667	750.9333081543	0.092232297119383
13	21.9101866666666668	109.2266684282	0.042067376836176
14	22.2105600000000001	95.5733339651	0.063886839167917
15	22.5382400000000002	68.2666650391	0.057598866908374
16	23.3574400000000000	109.2266684282	0.115856824097659
17	26.2246400000000001	136.5333300782	-0.001293838470025
18	28.7095466666666668	68.2666650391	-0.002682349507429
19	30.4571733333333333	40.9599997511	0.056051667401856
20	30.7302400000000002	109.2266684282	0.052917602162001
21	31.5221333333333333	54.6133342141	0.040897062816189
22	32.5870933333333335	163.8399990043	0.050814997482209
23	32.7782399999999997	54.6133342141	0.032903206643401
24	32.9693866666666672	81.9199995021	0.020327262124314
25	33.4062933333333338	232.1066713193	0.023481166977397

Figura 3.38 - Exemplo do formato de armazenamento dos valores de velocidade medidos com o processador de uma componente

Neste caso, como é medida uma componente de cada vez, a coluna *LDA1* representa as velocidades instantâneas da componente em causa.

4 TRATAMENTO DE DADOS E CARACTERIZAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste capítulo apresentam-se as características do escoamento afetado pela presença das hastes, assim como do leito e o tratamento dos dados em cada ensaio.

Todo o tratamento efetuado dos dados foi usando a ferramenta *Microsoft Excel*.

4.2. CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO

Neste subcapítulo é feita a caracterização do escoamento englobando a definição da topografia do fundo, densidade de hastes, alturas de escoamento e função de vazios.

4.2.1. TOPOGRAFIA DO LEITO

Com a finalidade de determinar a função de vazios, $\Psi(z)$, efetuaram-se medições da topografia do leito em todas as posições longitudinais.

Na Figura 4.1 encontra-se exemplificado o perfil transversal da topografia do leito medida com o laser portátil, a montante das hastes, no ponto P_0 . De referir que este se encontra relativamente homogêneo, excetuando a parte inicial que se encontra relativamente mais baixo que no resto da largura do canal. No entanto, verifica-se que o fundo do canal apresenta variações de altura na ordem dos 0,5 cm, podendo portanto aceitar os resultados obtidos. A média da altura do fundo neste ponto verifica-se ser ligeiramente inferior aos casos medidos entre a vegetação (3,4 cm) uma vez que esta zona encontrava-se ligeiramente à frente do início do agregado.

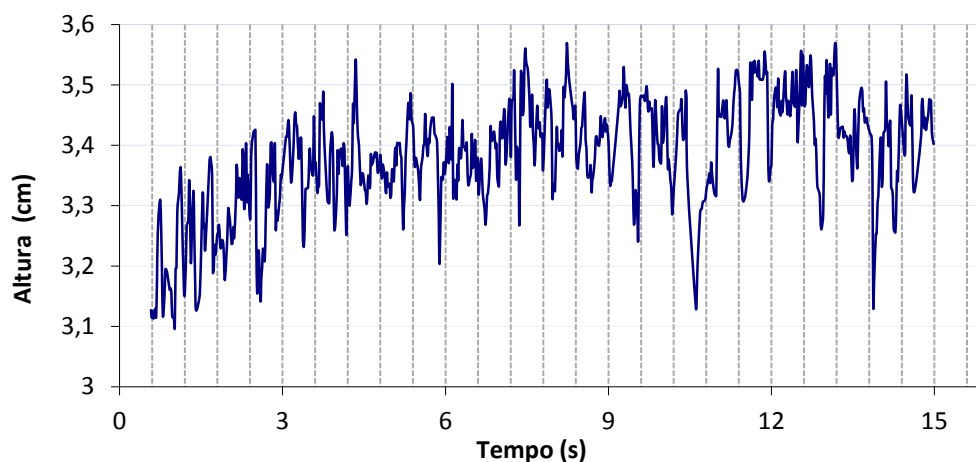


Figura 4.1 – Exemplo da topografia do leito no plano P_0

Como é possível reparar pela análise da Figura 4.1, e cujo procedimento se encontra explicado no subcapítulo 4.2.1, a topografia do leito foi determinada em função no tempo do ensaio. Como o dito ensaio foi efetuado manualmente, e com velocidade relativamente uniforme, é assumida a equidistância entre os pontos medidos.

Na Figura 4.2 encontra-se caracterizada a topografia do leito nos pontos de medição entre hastes, P_1 a P_7 . É possível reparar que existem pequenas variações, principalmente em P_4 e P_7 , porém o leito na zona com as hastes apresenta uma espessura média de 4,3 cm.

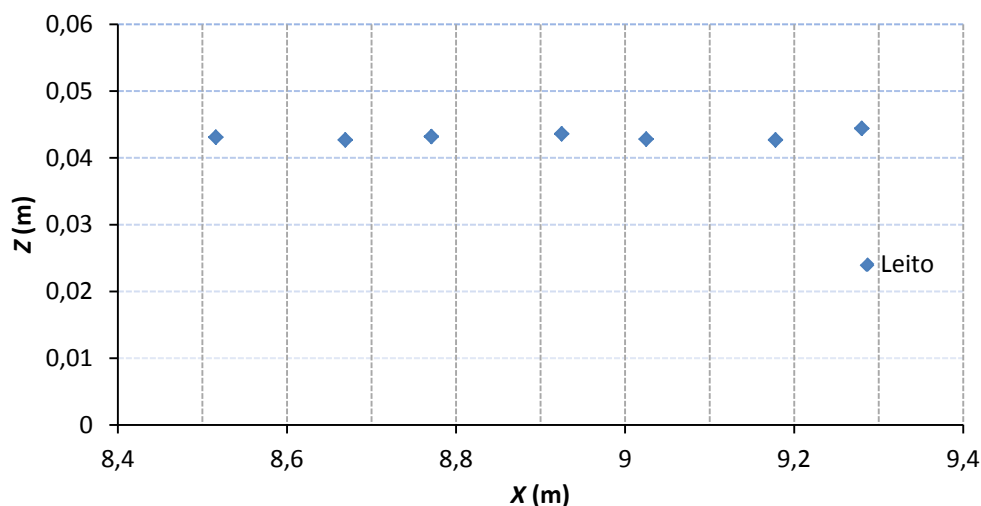


Figura 4.2 – Variação da topografia do fundo ao longo dos planos de medição entre hastes

4.2.2. OSCILAÇÕES DA SUPERFÍCIE LIVRE

Como já foi referido anteriormente, foi efetuada a medição das oscilações do escoamento em cada plano de medição, ao longo de nove pontos transversais, de forma a determinar especificamente a altura do escoamento.

Na Figura 4.3 encontra-se a variação da superfície livre, juntamente com a topografia do leito. Em primeira análise é possível verificar que a altura do escoamento diminui para jusante, o que seria de esperar num escoamento devido às perdas de carga ao longo do seu percurso.

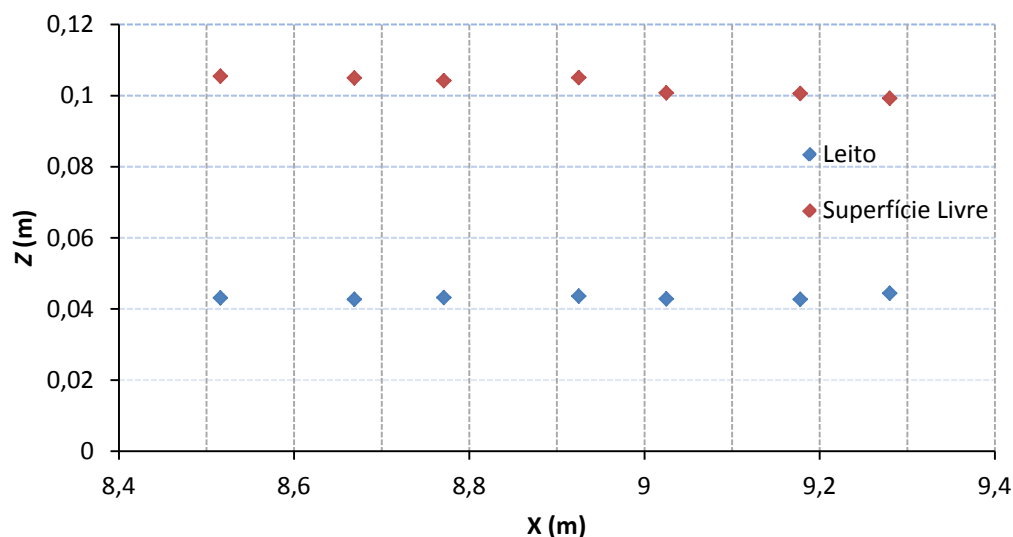


Figura 4.3 – Variação da superfície livre e do leito na região com vegetação

Na Tabela 4.1 encontram-se em resumo as características de cada trincheira necessárias para a determinação da função de vazios.

Tabela 4.1 – Características do escoamento em cada plano de medição

	Diâmetro das hastes (cm)	Altura das hastes acima do leito (cm)	Densidade de hastes (hastes/m ²)	Média Altura do Fundo (cm)	Média Altura da Água (cm)	Ponto mais alto do leito (cm)	Ponto mais baixo do leito (cm)
P ₀	1,1	19	0	3,389	8,330	3,578	3,098
P ₁	1,1	19	800	4,308	6,238	4,572	4,056
P ₂	1,1	19	400	4,269	6,226	4,490	4,011
P ₃	1,1	19	1200	4,318	6,102	4,582	4,047
P ₄	1,1	19	1600	4,206	6,298	4,527	4,030
P ₅	1,1	19	800	4,281	5,795	4,488	4,042
P ₆	1,1	19	400	4,267	5,792	4,496	4,007
P ₇	1,1	19	1200	4,441	5,484	4,642	4,220

4.2.3. FUNÇÃO DE VAZIOS

As funções de vazios são determinadas através dos valores mencionados acima. A análise é feita desde o fundo até ao fim das hastes, como se pode ver através dos vários valores que esta função assume consoante o plano em estudo.

Na Figura 4.4 encontra-se ilustrado o procedimento de cálculo da função de vazios, tomando P_0 como exemplo.

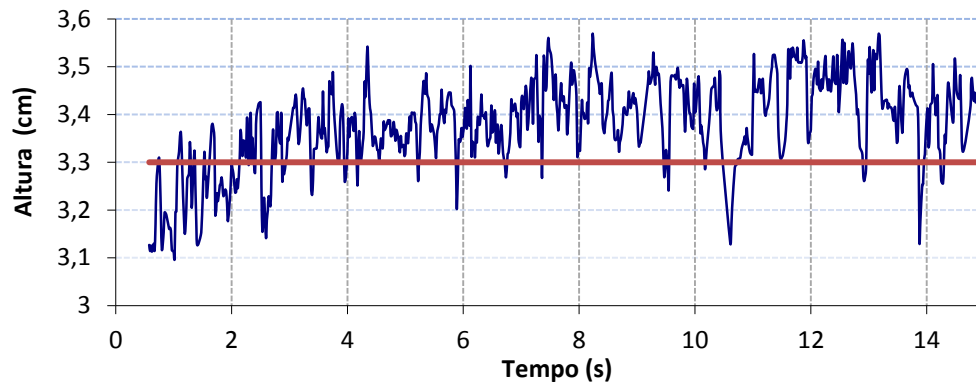
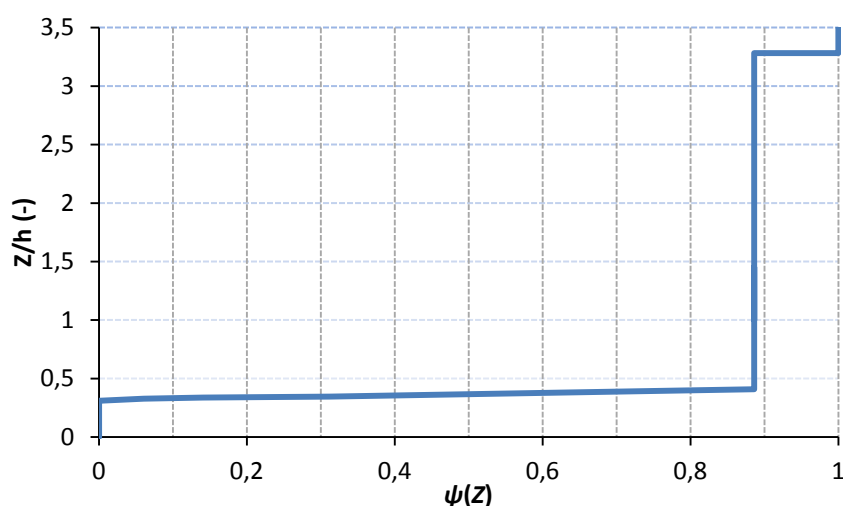


Figura 4.4 – Exemplo do princípio da determinação da função de vazios para o caso de P_0

A determinação da função de vazios inicia-se com a contabilidade dos pontos obtidos na fase da altimetria de fundo, que varia de caso para caso. De seguida a análise faz-se por planos verticais, com início no fundo do agregado, e uma vez que só existem a espaços ocupados ou espaços vazios, esta função é o complementar da fração de sólidos, sendo determinada pela diferença entre 1-fração de sólidos.

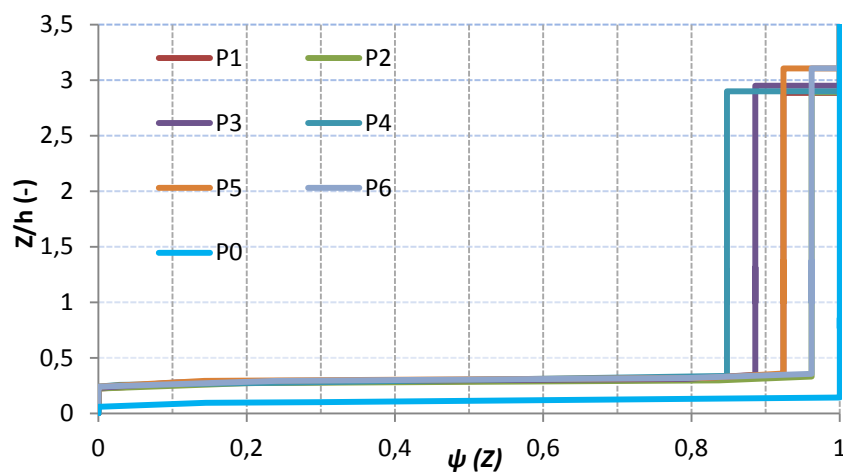
Tomando o exemplo de P_0 presente na Figura 4.4, e tomando a cota assinalada a linha vermelha como o plano em estudo, verifica-se que o fundo apresenta valores altos e baixo em relação à linha. Quando o solo, representado a azul, se encontra acima da linha significa que aqueles pontos se encontram preenchidos com solo. Se, por outro lado, o solo se encontrar abaixo da linha vermelho significa que, nesse ponto, se encontra um espaço vazio. Como caso apresentado na Figura 4.4 representa a zona sem vegetação, a função de vazios acima do solo é constante até à superfície livre e igual a 1. Nos outros planos de medição é contabilizada a fração das hastes com base na sua densidade.

O aspeto da função de vazios é facilmente decifrado e explicado à luz do seu cálculo. O primeiro troço vertical com valor nulo para $\Psi(z)$ reflete a quantidade de espaços vazios existente no agregado rugoso. Em planos mais próximos da superfície do agregado são detetados espaços vazios, e esses são reproduzidos pelo troço ascendente. De seguida, na água, como apenas existem as hastes o valor da função de vazios apenas está afetado da fração das hastes. Quando o plano vertical ultrapassa o fim das hastes já não existe fração de sólidos, sendo que a função de vazios é unitária.

Figura 4.5 – Função de vazios em P_7

No geral, o aspeto da função de vazios, de todos os planos onde esta função foi calculada, é semelhante ao aspeto evidenciado na Figura 4.5, exceto no caso de P_0 uma vez que a fração das hastes não existe (Figura 4.6).

De salientar que o valor de $z/H = 1$ representa a superfície livre e os valores superiores referem-se aos dados até ao fim das hastes.

Figura 4.6 – Funções de vazios de P_0 a P_6

Na Tabela 4.2 encontra-se o valor que a função de vazios toma para cada zona de medição dos perfis de velocidade com o laser do sistema *LDA*

Tabela 4.2 – Funções de Vazios nas zonas de medição do laser

Função de Vazios	
P_0	1,000
P_1	0,924
P_2	0,962
P_3	0,886
P_4	0,848
P_5	0,924
P_6	0,962
P_7	0,886

4.3. CARACTERIZAÇÃO DO CAMPO DE VELOCIDADES

Os campos de velocidades medidos estão divididos por componente, isto é, longitudinal e vertical. No âmbito deste estudo foi usada a DAM e como tal os dados foram tratados com vista a apresentar dados médios no tempo e no espaço. Embora a teoria sirva como ponto de partida para compreender esta metodologia, as expressões teóricas apresentadas no Capítulo 2 foram discretizadas e simplificadas no presente capítulo.

Depois de adquiridos os valores da velocidade, e para uma correta estimativa do valor médio temporal da velocidade, é necessário entrar em consideração com um fator g (Albrecht, 2010). O fator a entrar em conta será o *Transit Time* (τ_i), que se refere ao tempo que cada partícula demora a atravessar o volume de controlo (Zhang, 2010), e portanto será adotada a seguinte relação:

$$g_i = \tau_i \quad (4.1)$$

Uma vez que os valores de *Transit Time* (τ_i) a respetiva velocidade são dados adquiridos no software BSA, a velocidade média temporal é determinada pela expressão seguinte:

$$\bar{u} = \frac{\sum_{i=1}^n u_i \tau_i}{\sum_{i=1}^n \tau_i} \quad (4.2)$$

As flutuações da velocidade determinam-se pela expressão seguinte.

$$u' = u - \bar{u} \quad (4.3)$$

No caso da velocidade média temporal e espacial é feito:

$$\langle \bar{u} \rangle = \sum_{i=1}^n \frac{\bar{u}_i}{n} \quad (4.4)$$

onde n representa a quantidade de valores segundo os quais se pretende fazer a média espacial.

Na determinação dos momentos de segunda ordem, Equação (4.7), e cruzados, Equação (4.8), é também incluído o fator de ponderação referido anteriormente e são determinados, respetivamente, através das expressões:

$$\sigma_u^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2 g_i}{\sum_{i=1}^n g_i} \quad (4.5)$$

$$\overline{u'v'} = \frac{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})(v_i - \bar{v}) g_i}{\sum_{i=1}^n g_i} \quad (4.6)$$

4.3.1. COMPONENTE LONGITUDINAL DA VELOCIDADE

4.3.1.1. Perfis Verticais da Velocidade Média Espaço-Temporal

Durante o procedimento experimental, à medida que foram adquiridos os dados da velocidade, foram determinados os perfis de velocidade, de cada componente, em cada ponto transversal.

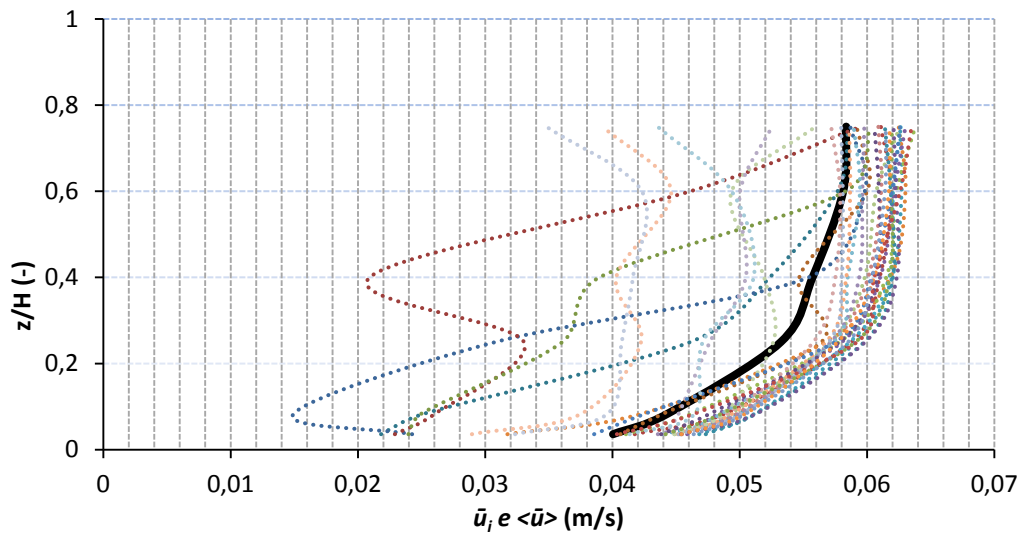


Figura 4.7 – Perfis verticais médios temporais (\bar{u}_i nas linhas ponteadas) em cada ponto transversal e perfil médio no espaço e no tempo ($\langle \bar{u} \rangle$ na linha contínua escura) de P_0

A posição P_0 apresenta um perfil médio no espaço e no tempo típico para os casos de escoamentos turbulentos sem a presença de vegetação. Existem apenas algumas exceções ao perfil esperado, mas tal não se reflete na média de todos os perfis neste plano.

Na

Figura 4.8 encontram-se os 31 perfis médios temporais (linhas ponteadas) e o perfil médio no espaço e no tempo (linha contínua), para o caso do P_7 .

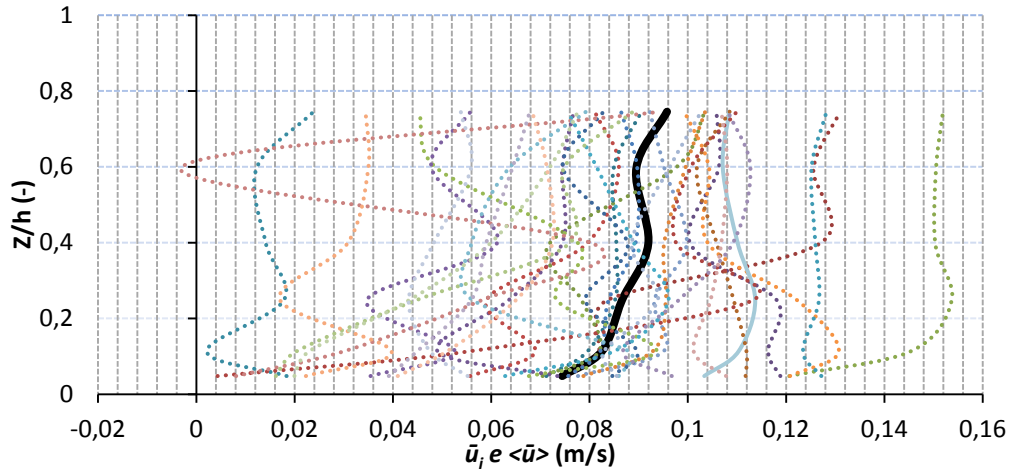


Figura 4.8 – Perfis verticais médios temporais (\bar{u}_i nas linhas pontilhadas) em cada ponto transversal e perfil médio no espaço e no tempo ($\langle \bar{u} \rangle$ na linha contínua escura) de P_7

Nos perfis ilustrados acima é possível verificar que existe uma variação significativa nos perfis de velocidade, genericamente abaixo do limite $z/h = 0,4$, indicando um regime tridimensional, sendo que abaixo deste valor o escoamento é condicionado pelas formas de fundo.

Esta análise foi efetuada ao longo do estudo, resumindo na

Figura 4.8 os perfis médios no espaço e no tempo dos planos P_1 a P_7 , sendo que a análise seguinte foi efetuada para os dados normalizados. Nos casos onde é usada a análise através de dados normalizados, usa-se a notação:

$$\langle \bar{u} \rangle = U \quad (4.7)$$

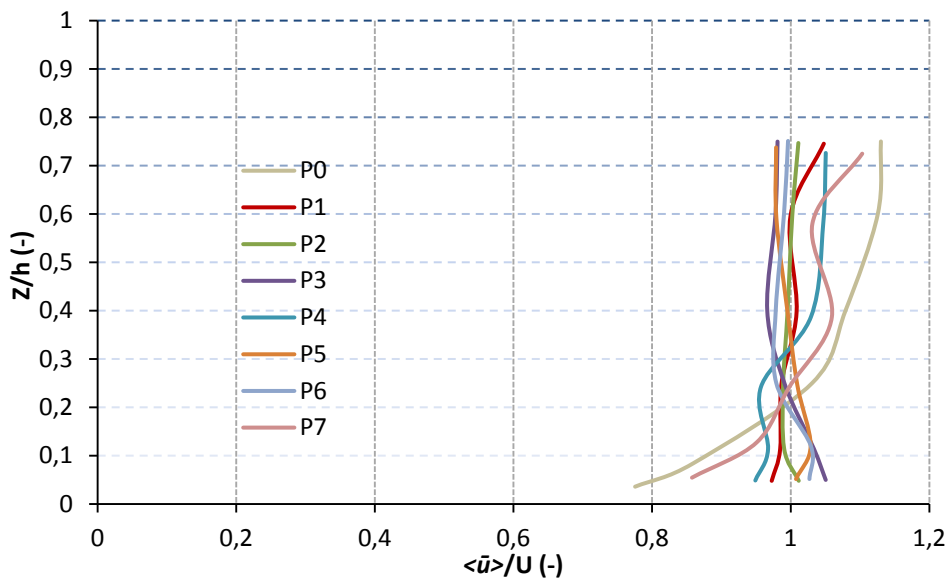


Figura 4.9 – Perfis velocidade média no tempo e no espaço, $\langle \bar{u} \rangle$, dos perfis P_1 a P_7

Observando os perfis de P_0 a P_7 verifica-se que, salvo as exceções de P_6 e P_3 , as velocidades são mais baixas junto ao leito, do que na região da superfície livre. Estas conclusões vão de encontro aos conceitos teóricos introduzidos no Capítulo 2.

Na Tabela 4.3 encontra-se um resumo dos valores médios no tempo e no espaço, em valores não normalizados, para cada ponto transversal de cada plano longitudinal.

Tabela 4.3 – Valores Médios no espaço e no tempo da velocidade na componente longitudinal nos vários planos de medição (m/s)

	P_0	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7
3 mm	0,040	0,069	0,075	0,083	0,065	0,082	0,086	0,069
7 mm	0,044	0,070	0,074	0,081	0,066	0,083	0,086	0,076
25%	0,053	0,070	0,074	0,078	0,065	0,082	0,082	0,080
40%	0,056	0,072	0,074	0,076	0,070	0,081	0,082	0,085
60%	0,058	0,071	0,075	0,077	0,071	0,079	0,083	0,083
75%	0,058	0,074	0,075	0,077	0,072	0,079	0,084	0,088

É possível analisar pela tabela acima que a velocidade média a montante é menor do que a velocidade dos planos entre a vegetação. Tal deve-se ao facto da vegetação ocupar toda a largura do canal, impondo um obstáculo à passagem do escoamento, sendo que este abranda à entrada da região com as hastes. É possível constatar que os planos P_3 , P_5 e P_7 são os que apresentam as maiores velocidades, facto que pode ser justificado devido à variação da densidade de hastes em cada plano. Tanto em P_3 como em P_7 existe um aumento da densidade de hastes de 400 para 1200, ou seja, existe menos área livre para o escoamento fluir, aumentando assim a velocidade do escoamento. A zona do plano P_5 sucede à região com maior densidade de hastes no canal, 1600 hastes/m², o que pode indicar uma possível justificação para o facto dos valores deste plano serem dos mais elevados.

Na Tabela 4.4 encontram-se os valores do número de Reynolds das hastes (*stem Reynolds number*, Re_D), para cada plano de medição, e os valores usados para a sua determinação segundo a Equação (2.26). Como se pode verificar, através da análise dos limites referidos no subcapítulo 2.5, os valores do número de Reynolds das hastes são consistentes com escoamentos turbulentos.

Tabela 4.4 – Número de Reynolds das hastes

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7
U (m/s)	0,0709	0,0744	0,0787	0,0682	0,0810	0,0839	0,0802
d (m)	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
v (m ² /s)	1E-6	1E-6	1E-6	1E-6	1E-6	1E-6	1E-6
Re_D	777,570	816,397	863,481	748,491	888,628	920,161	879,648

4.3.1.2. Perfis Transversais da Velocidade Média Espaço-Temporal

Após a medição dos perfis verticais é possível fazer a análise do escoamento ao longo da largura do canal para cada plano de altura, apresentados com linha pontuada colorida para as seis alturas de

medição. Foi ainda efetuada a média desses perfis, apresentando o perfil médio no espaço e no tempo, representada a traço grosso nas Figuras 4.10 a 4.16. De seguida apresentam-se os perfis transversais nos sete planos de medição entre hastes.

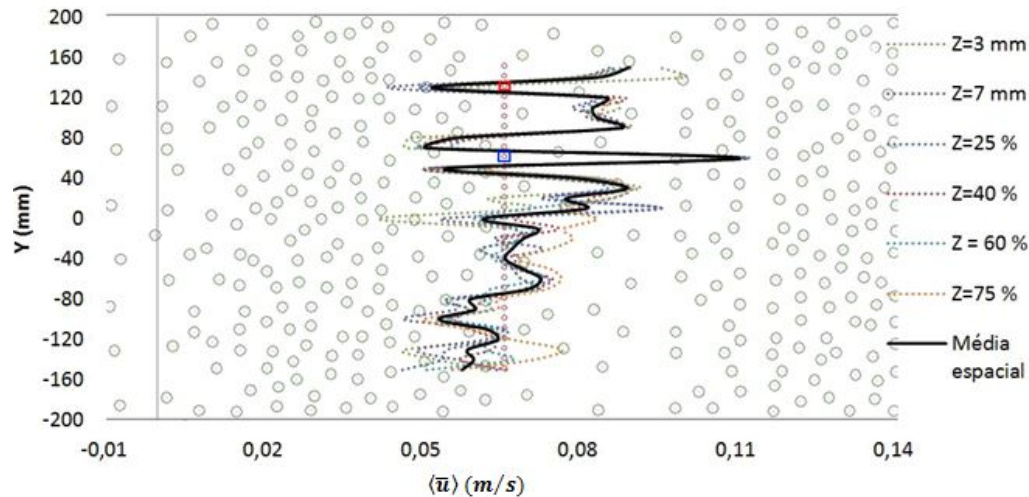


Figura 4.10 – Perfis Transversais da componente longitudinal da velocidade em P_1

Em todos os perfis a velocidade apresenta-se com grandes variações. Esse facto deve-se à natureza do escoamento turbulento, do leito, e dos obstáculos que existem no canal.

Na Figura 4.10 é possível visualizar retângulos a assinalar pontos de medições, com o intuito de assinalar pontos de interesse. O caso do retângulo vermelho encontra-se a assinalar pontos de medição que apresentam valores baixos de velocidade, onde é possível observar a existência de hastes a montante e a ausência destas a jusante. Por outro lado, o retângulo azul assinala a ausência de obstáculos ao escoamento a montante do ponto e sem densidade significativa a jusante. Estes dois fatores combinados justificam o pico de velocidade neste ponto em relação aos circundantes.

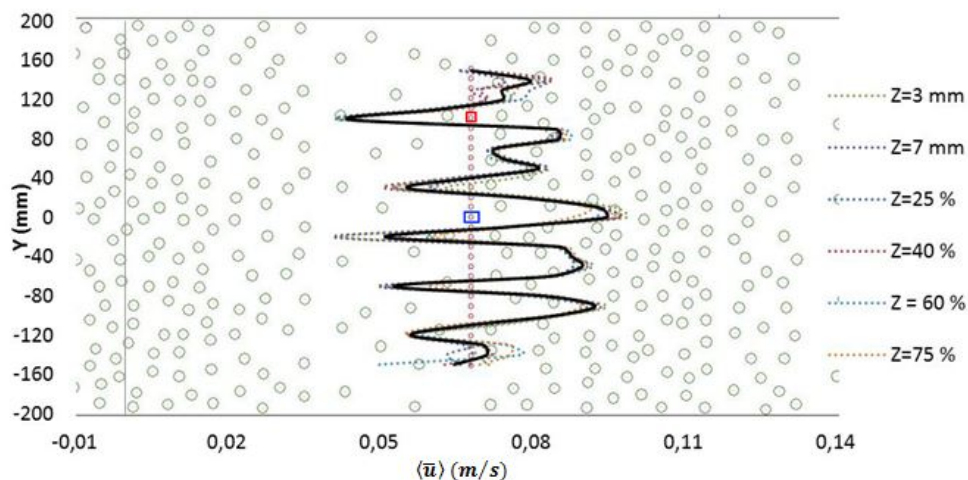


Figura 4.11 – Perfis Transversais da componente longitudinal da velocidade em P_2

Em termos de valor da velocidade, o P_2 não difere significativamente do P_1 , porém o aspeto do perfil transversal é mais suave. Neste plano a densidade das hastes adota o valor mais baixo registado no canal, como é possível verificar na Figura 4.11. Efetuando uma análise análoga à anterior é possível assinalar que a velocidade adota valores mais elevados quando existem largos corredores sem a existência de obstáculos ao escoamento, assinalado a azul. Como no caso anterior, os valores de velocidade mais baixos justificam-se com a presença de hastes a montante do plano de aquisição de dados, assinalado a vermelho.

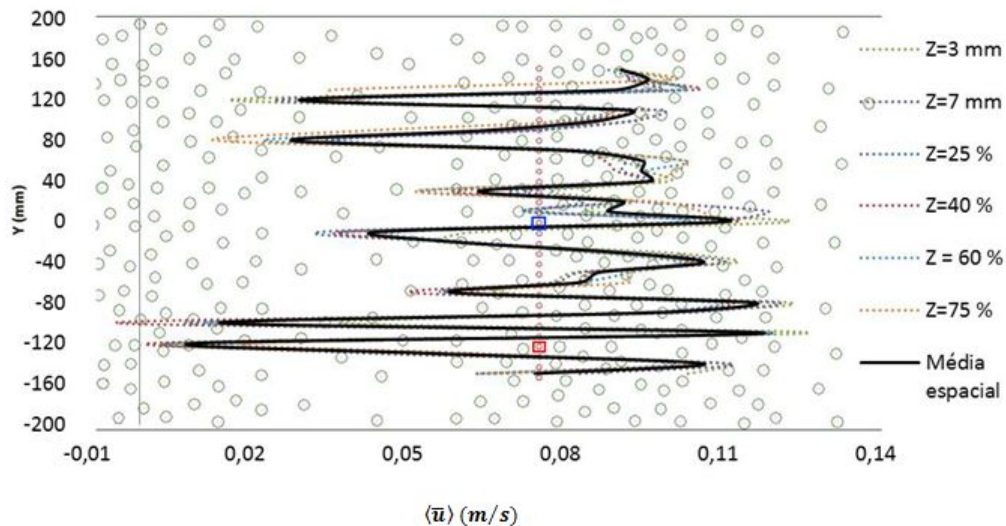


Figura 4.12 – Perfis Transversais da componente longitudinal da velocidade em P_3

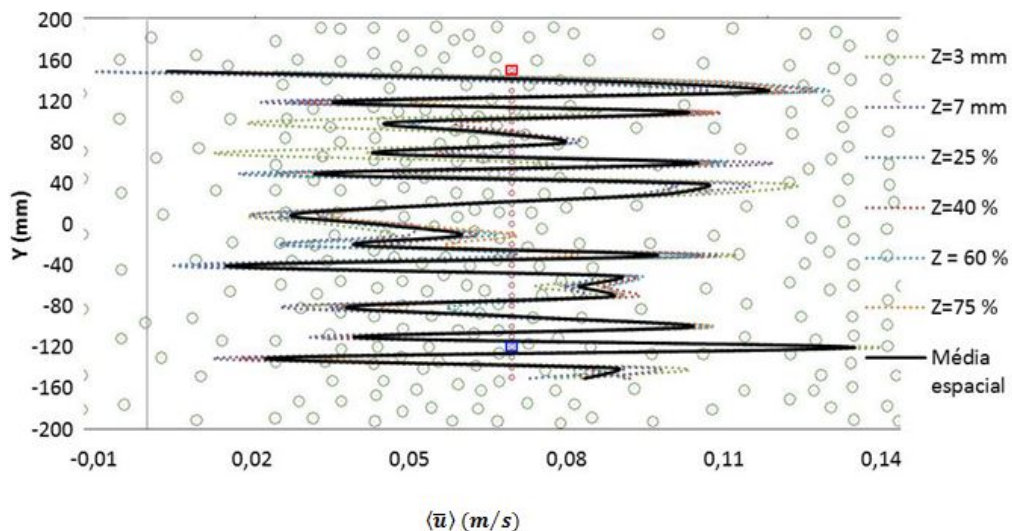


Figura 4.13 – Perfis Transversais da componente longitudinal da velocidade em P_4

Embora os valores registados em P_3 sejam ligeiramente superiores aos verificados em P_4 , os perfis transversais nestes dois casos apresentam-se muito semelhantes. Nestes dois pontos, com a densidade de hastes 1200 e 1600 respetivamente, verifica-se a existência de uma maior variação nas velocidades

registadas que espelha uma maior turbulência gerada pela existência de hastes dispostas mais densamente. Apesar de se registarem, nestes dois perfis, alguns pontos com valores de velocidade bastante baixos, também se encontra o oposto com valores altos, caracterizando a natureza da turbulência gerada.

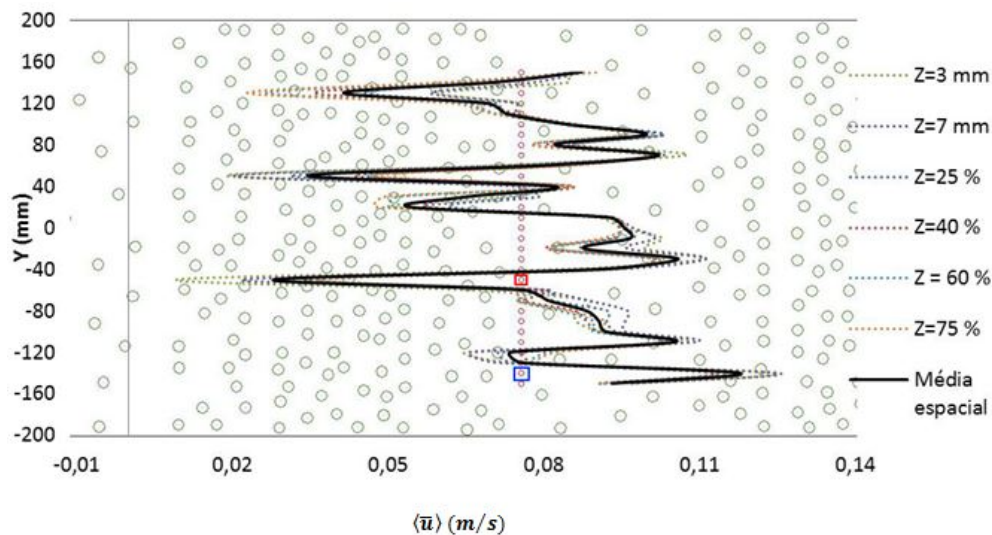


Figura 4.14 – Perfis Transversais da componente longitudinal da velocidade em P_5

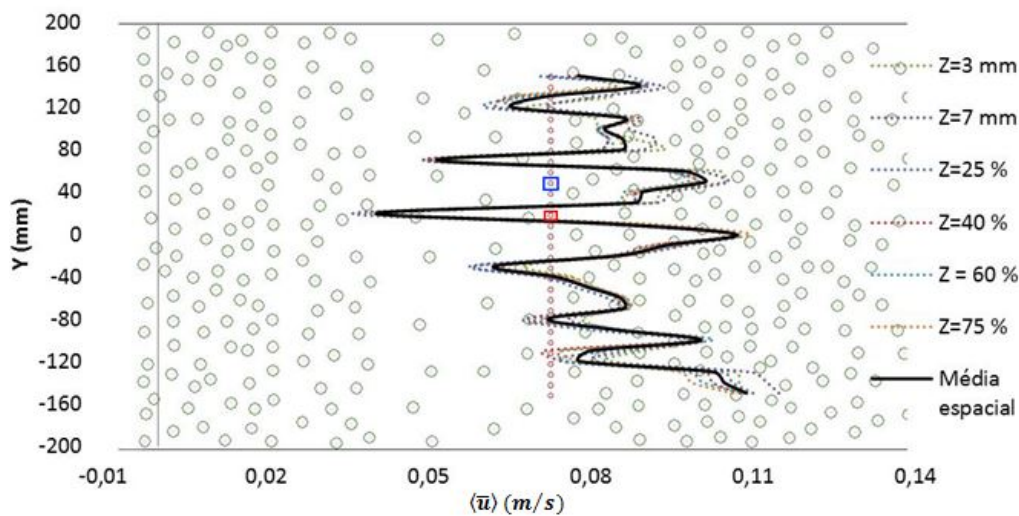


Figura 4.15 – Perfis Transversais da componente longitudinal da velocidade em P_6

Como já foi referido, P_5 é dos perfis que apresentam valores superiores de velocidade e é possível verificar que esta trincheira encontra-se entre duas regiões com os valores limites de densidade de hastes, 1600 e 400. No entanto, vários pontos encontram-se afetados de valores baixos de velocidade pela existência de hastes imediatamente a montante.

Ao contrário de P_5 , o perfil de P_6 revela que esta região não apresenta tanta turbulência como o anterior. É muito similar a P_2 em vários aspetos, e apresenta os valores mais elevados no centro do canal tal como P_2 .

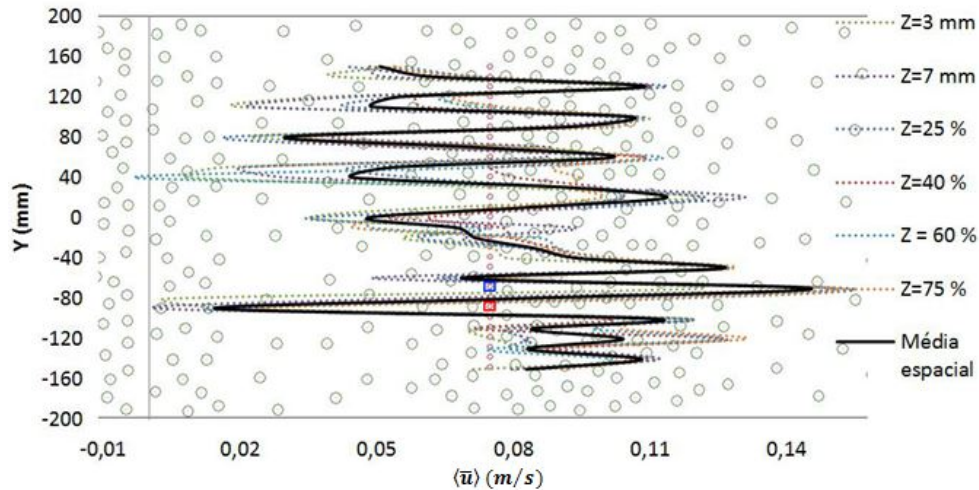


Figura 4.16 – Perfis Transversais da componente longitudinal da velocidade em P_7

É nesta trincheira que se verificam os valores mais elevados de velocidade, e apresenta um perfil semelhante a P_3 e P_4 , sendo que a avaliação feita nesses dois casos é válida para esta trincheira. De realçar a rápida variação dos valores de velocidade de valores elevados para relativamente mais baixos, demonstrada pelos retângulos azul e vermelho respetivamente.

4.3.2. COMPONENTE VERTICAL DA VELOCIDADE

4.3.2.1. Perfis Verticais da Velocidade Média Espaço-Temporal

Na Figura 4.17 encontram-se os perfis de velocidade da componente vertical, e é possível verificar que esta componente, quando comparada à longitudinal, apresenta valores muito próximos de zero.

A existência de variações de valores de velocidade, entre positivos e negativos, confere um carácter de tridimensionalidade ao escoamento.

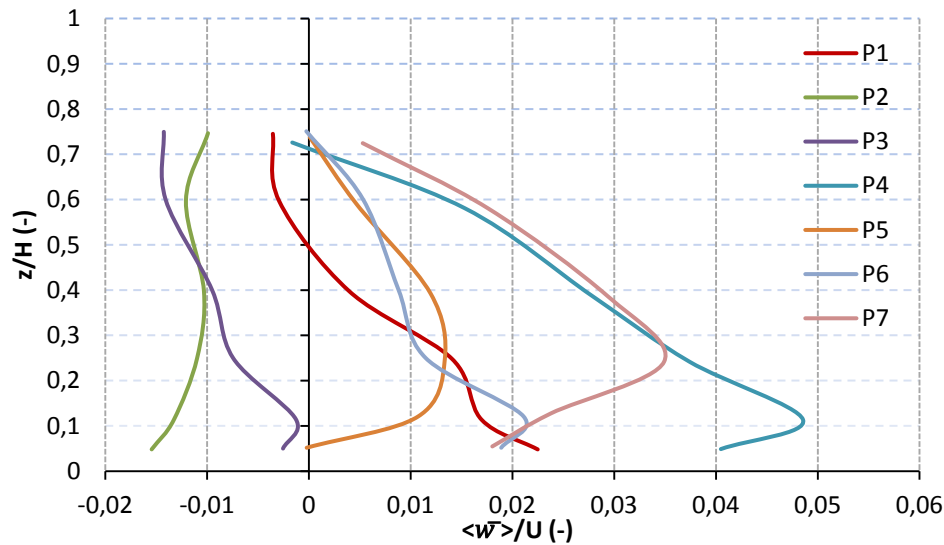


Figura 4.17 – Perfis verticais da componente vertical da velocidade de P₁ a P₇

Existe uma divisão do movimento preferencial de cima para baixo, nos planos P₃ e P₂, como é possível verificar pelos valores negativos da velocidade na Figura 4.17. Por outro lado os restantes apresentam movimento preferencial de baixo para cima, caracterizado pelos valores positivos.

Observa-se que os perfis em regiões de alta densidade das hastes apresentam maiores valores para as velocidades e com movimento predominantemente ascendente.

4.3.2.2. Perfis Transversais da Velocidade Média Espaço-Temporal

Analogamente ao procedimento efetuado no subcapítulo 4.3.1.2, foram analisados os perfis médios por altura, representados pelas linhas coloridas ponteadas, e posteriormente a determina-se o perfil médio no espaço e no tempo representado a traço grosso nas Figuras 4.18 a 4.24. Mais uma vez o caráter aleatório do escoamento apresenta-se através das oscilações dos perfis das velocidades.

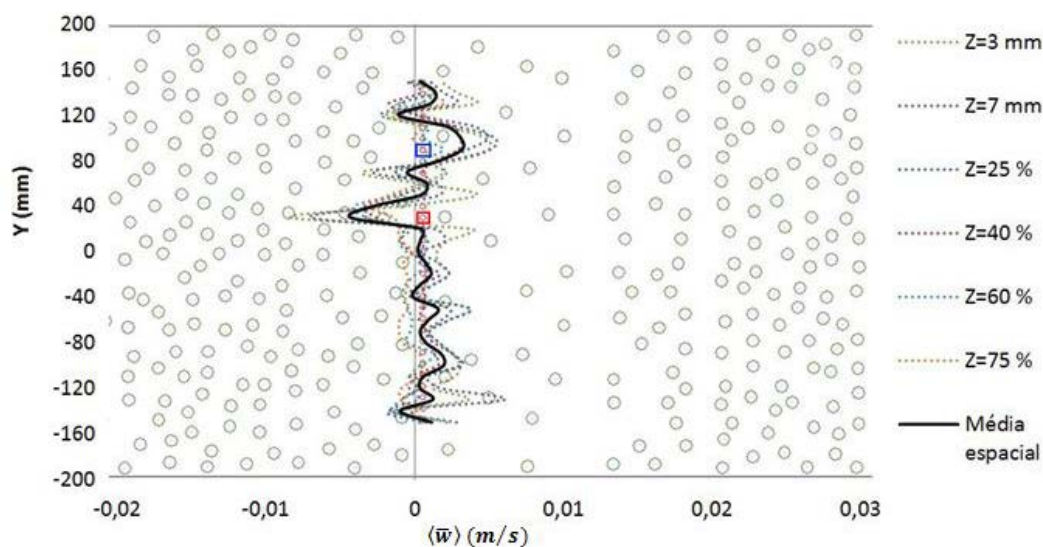


Figura 4.18 – Perfis Transversais da componente vertical da velocidade em P₁

Em cada plano de medição foram salientados pontos de interesse através de retângulos azuis e vermelhos, sendo que os azuis representam valores, em regra, mais elevados e os vermelhos mais baixos.

Salientado a vermelho na Figura 4.18 encontra-se o ponto de medição com maior valor para a componente vertical do escoamento. Atrás, e diretamente à frente deste ponto, não existem hastes podendo o escoamento fluir. Por outro lado, quando se verifica a existência de hastes atrás e à frente do ponto de medição verifica-se que o escoamento apresenta movimento descendente (daí o valor da velocidade se expressar em valores negativos). Tirando estes dois pontos salientados averigua-se que existe uma variação quase constante nos valores da velocidade.

A mesma justificação é válida para o caso de P_2 e P_3 , representados na Figura 4.19 e Figura 4.20, respetivamente. Em P_2 verifica-se que o valor mais alto da velocidade apresenta-se quando não existem hastes imediatamente a jusante, nem a montante, enquanto que em P_3 verifica-se a existência de várias hastes tanto a montante como jusante, sendo que os turbilhões do conjunto de hastes pode contribuir para a agitação local. Para o menor valor observado verifica-se que a existência de uma haste imediatamente a jusante da medição também confere ao escoamento movimento descendente (com a ausência de haste a montante).

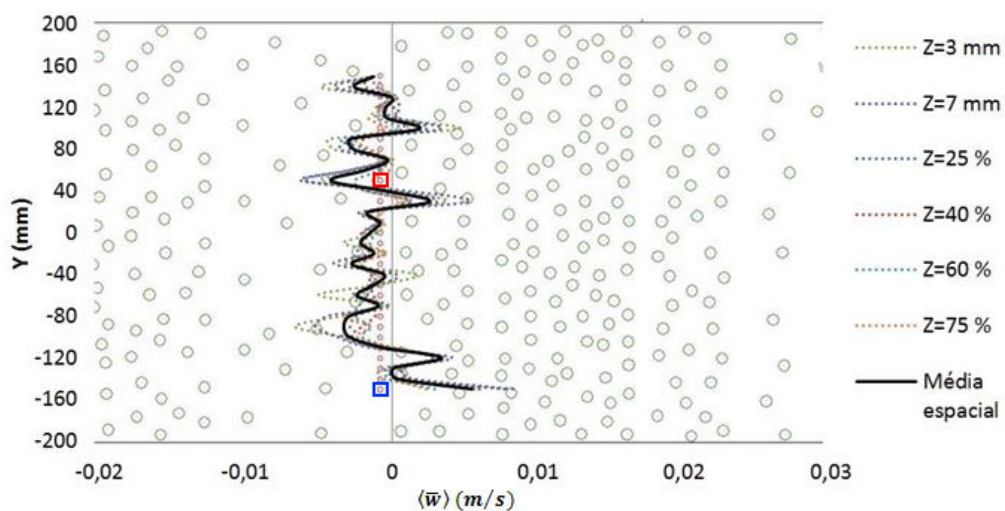
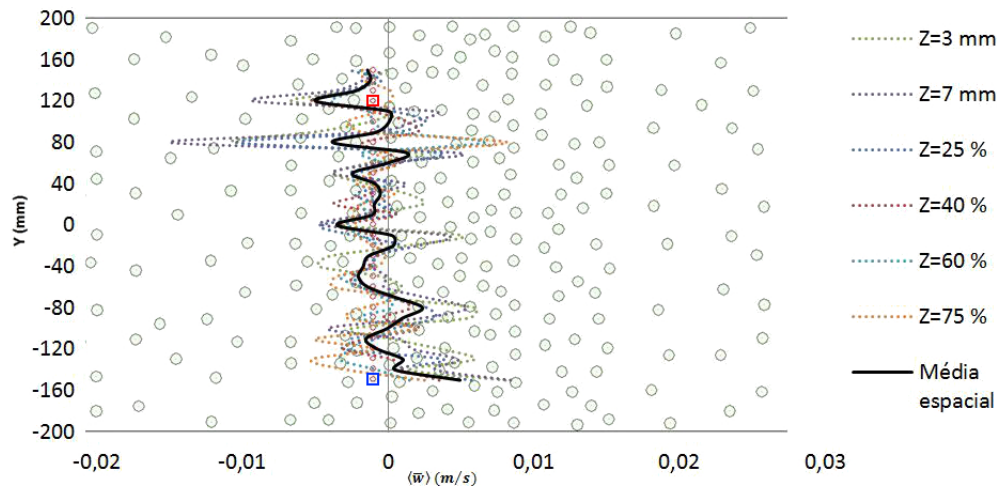
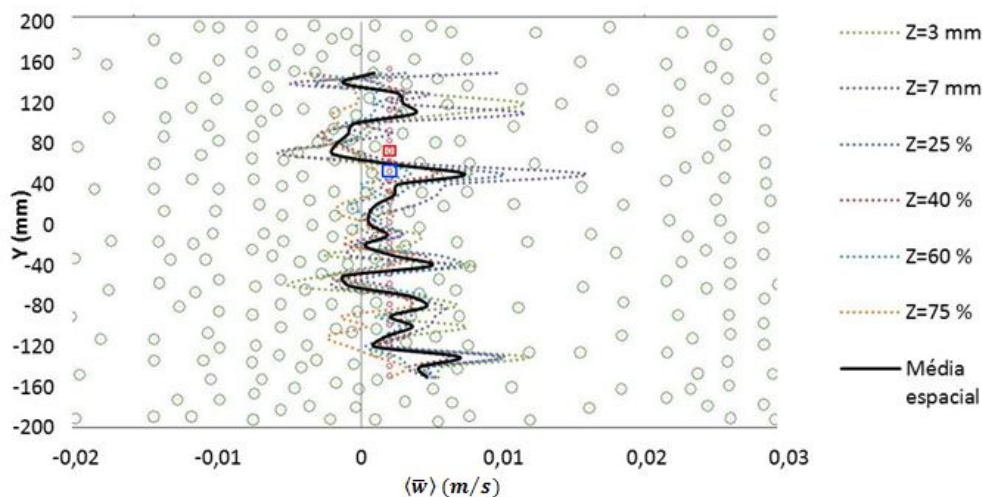


Figura 4.19 - Perfis Transversais da componente vertical da velocidade em P_2

Figura 4.20 - Perfis Transversais da componente vertical da velocidade em P_3

No que diz respeito aos valores mais baixos, em P_4 (Figura 4.13) mantém-se a tendência da influência da proximidade de hastes, tanto a montante como jusante. Salientado a azul encontra-se um ponto de medição quase encostado a uma haste atrás deste, e no entanto apresenta um valor maior quando comparado com o resto do plano de medição. Tal valor pode-se dever à agitação do escoamento atrás de um obstáculo. De referir que P_4 é a trincheira com maior densidade de hastes (1600 hastes/m^2) e encontra-se evidenciado pelo maior valor registado para esta componente da velocidade ($0,0024 \text{ m/s}$), ainda que seja um valor muito pequeno quando comparado os valores registados para a componente longitudinal.

Figura 4.21 - Perfis Transversais da componente vertical da velocidade em P_4

Na Figura 4.22 encontram-se representados os perfis transversais de P_5 e, tal como verificado no caso de P_3 , confirma-se o aumento da velocidade quando existem hastes isoladas a montante e jusante do ponto de medição. Situação idêntica ocorre em P_6 , representada na Figura 4.23, onde existem hastes isoladas a influenciar o ponto de medição destacado a azul. Por outro lado, a existência de várias

hastes juntas a montante pode influenciar o escoamento, obtendo valores mais baixos, como se verifica no retângulo a vermelho na Figura 4.22.

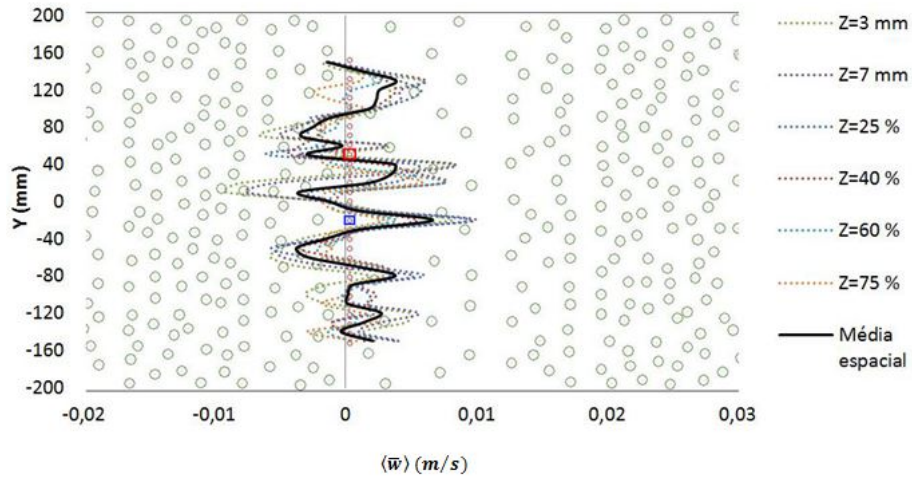


Figura 4.22 - Perfis Transversais da componente vertical da velocidade em P_5

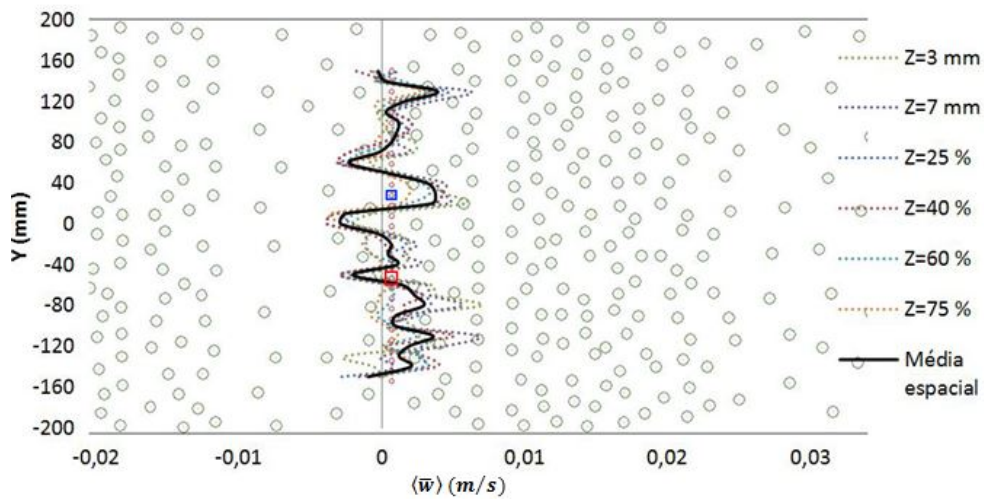


Figura 4.23 - Perfis Transversais da componente vertical da velocidade em P_6

O perfil da velocidade vertical, apresentado na Figura 4.24, revela a maior oscilação e maior discrepância no que diz respeito à média temporal e espacial de todos os planos de medição estudados, sendo este 0,002 m/s. Neste caso, como no caso de P_3 , é efetuada a medição numa região com densidade de 1200 hastes/m² seguido de uma região com 1600 hastes/m².

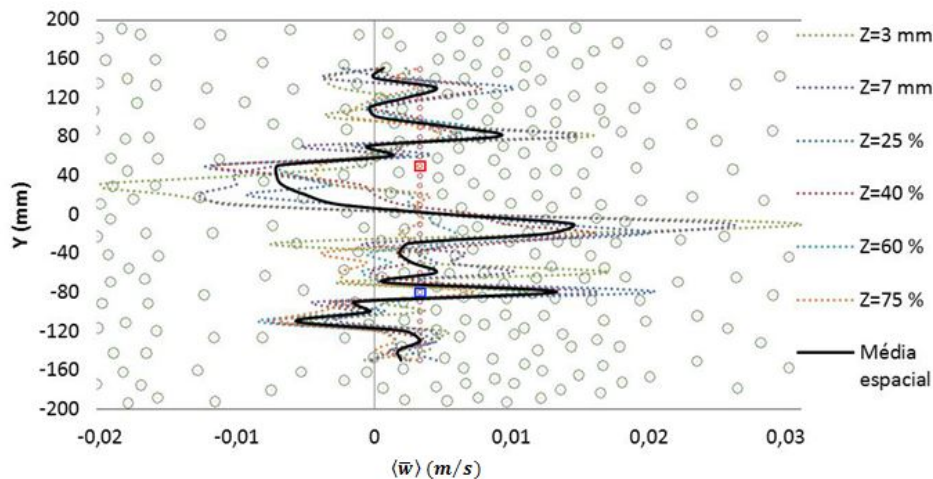


Figura 4.24 - Perfis Transversais da componente vertical da velocidade em P_7

O retângulo azul representa um ponto com uma variação rápida, e elevada, no valor registado da velocidade numa zona onde não existem hastes a montante existindo à frente. Porém, estas não estão centradas à sua frente mas sim um pouco desviadas, criando uma “linha” sem obstáculos. No outro ponto, realçado a vermelho, verifica-se um conjunto de hastes, tanto a montante como jusante, contribuindo para o valor reduzido obtido.

No geral esta componente apresenta valores com variações mais uniformes que a componente longitudinal, e P_7 apresenta as variações mais bruscas e os valores mais elevados, tanto positivos como negativos. É possível observar um movimento predominantemente ascendente, caracterizados pelos valores médios positivos nos perfis transversais, nos planos de medição que apresentem uma densidade de hastes maior que a zona imediatamente a jusante. Tal facto verifica-se nas zonas P_1 e P_5 , que apresentam uma densidade de 800 para 400 hastes/ m^2 na região a jusante do plano de medição, e a zona P_4 que passa de 1600 para 1200 hastes/ m^2 .

Por outro lado ao observar as regiões medidas que apresentem, a jusante, zonas com maior densidade de vegetação verifica-se que o escoamento é predominantemente descendente, à exceção de P_7 , como se pode examinar nos casos de P_2 e P_6 . Estas trincheiras apresentam valores, em módulo, mais pequenos na componente vertical da velocidade, quando comparados com as zonas descritas com sentido ascendente.

4.4. CARACTERIZAÇÃO DOS PERFIS DE TENSÃO NORMAL E TANGENCIAL

As tensões normais e tangenciais foram calculadas através das relações apresentadas na Tabela 4.5 e Tabela 4.6, recorrendo a valores previamente determinados da velocidade, nas duas componentes, e da função de vazios.

Tabela 4.5 – Determinação das tensões normais

	Componente Longitudinal, u	Componente Longitudinal, w
Reynolds	$\Psi\langle u'u' \rangle$	$\Psi\langle w'w' \rangle$
Tensões Dispersivas	$\Psi\langle \tilde{u}\tilde{u} \rangle$	$\Psi\langle \tilde{w}\tilde{w} \rangle$
Tensões Totais	$\langle \tau_x \rangle / \rho = \Psi\langle u'u' \rangle + \Psi\langle \tilde{u}\tilde{u} \rangle$	$\langle \tau_y \rangle / \rho = \Psi\langle w'w' \rangle + \Psi\langle \tilde{w}\tilde{w} \rangle$

Tabela 4.6 - Determinação das tensões tangenciais

Tensões Tangenciais	
Reynolds	$\Psi\langle u'w' \rangle$
Tensões Dispersivas	$\Psi\langle \tilde{u}\tilde{w} \rangle$
Tensões Totais	$\langle \tau_{xz} \rangle / \rho = \Psi\langle u'w' \rangle + \Psi\langle \tilde{u}\tilde{w} \rangle$

4.4.1. PERFIS DE TENSÃO NORMAL

A análise das tensões normais engloba a tensão de Reynolds, dispersiva e a soma destas duas perfazendo a tensão total. Na Figura 4.25 e Figura 4.27 encontram-se os perfis de distribuição vertical das tensões de Reynolds e dispersivas.

De realçar que no estudo do escoamento em P_0 apenas foi possível estudar a componente longitudinal do escoamento por incapacidade de conseguir captar sinal no sistema *LDA* quando da medição da componente vertical.

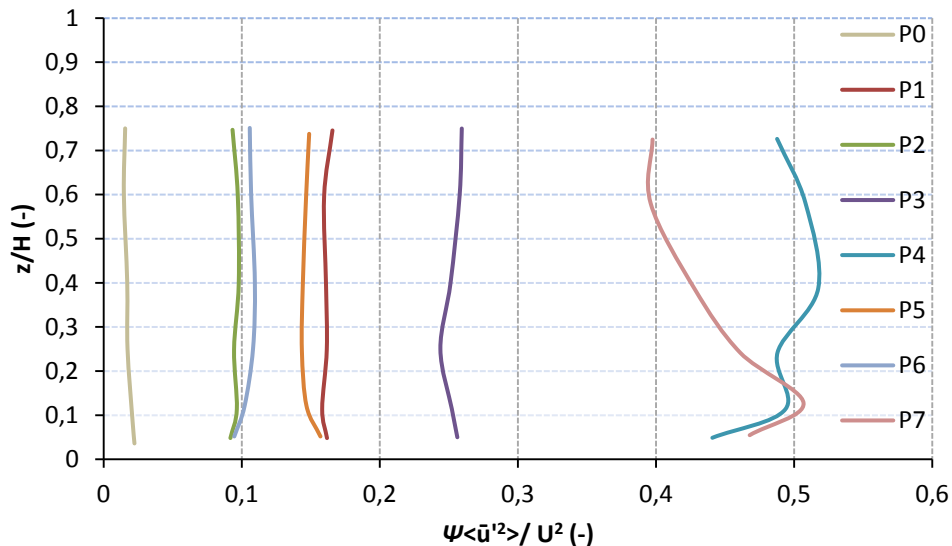


Figura 4.25 – Distribuição vertical das tensões normais de Reynolds da componente longitudinal

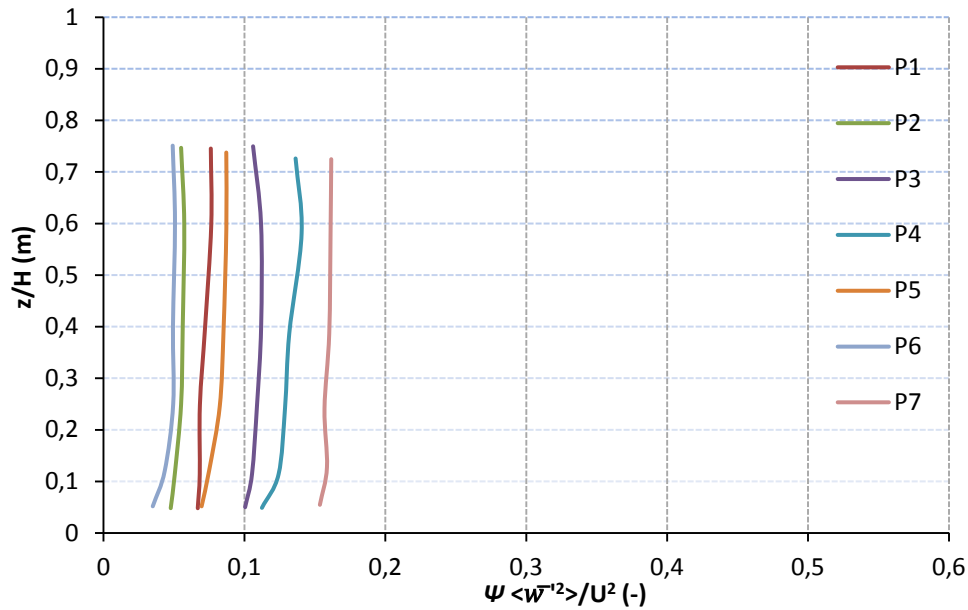


Figura 4.26 – Distribuição vertical das tensões normais Reynolds da componente vertical

Observando as distribuições dos perfis de tensões normais de Reynolds é possível concluir que as regiões que apresentam maior densidade de hastes correspondem às que exibem maiores valores para as tensões normais de Reynolds. Entre as tensões da componente longitudinal e vertical, verifica-se que a primeira corresponde a valores muito mais elevados. Fazendo uma análise comparativamente ao trabalho de Ana Margarida Ricardo (2008), é possível concluir que no presente trabalho existe uma maior relevância das tensões, porém neste estudo é simulada vegetação com maior densidade que no estudo realizado no IST, portanto tal seria de esperar.

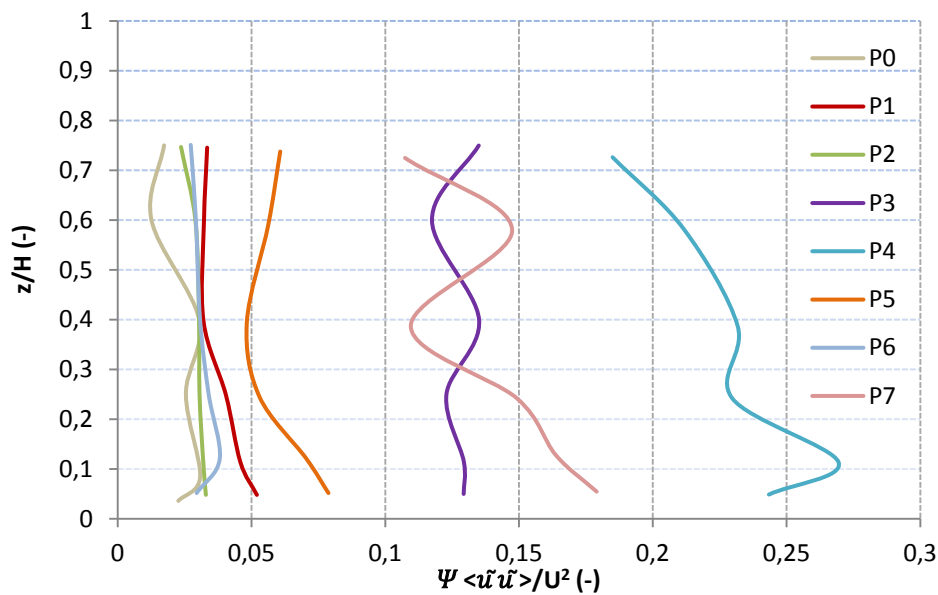


Figura 4.27 - Distribuição vertical das tensões normais dispersivas da componente longitudinal u'

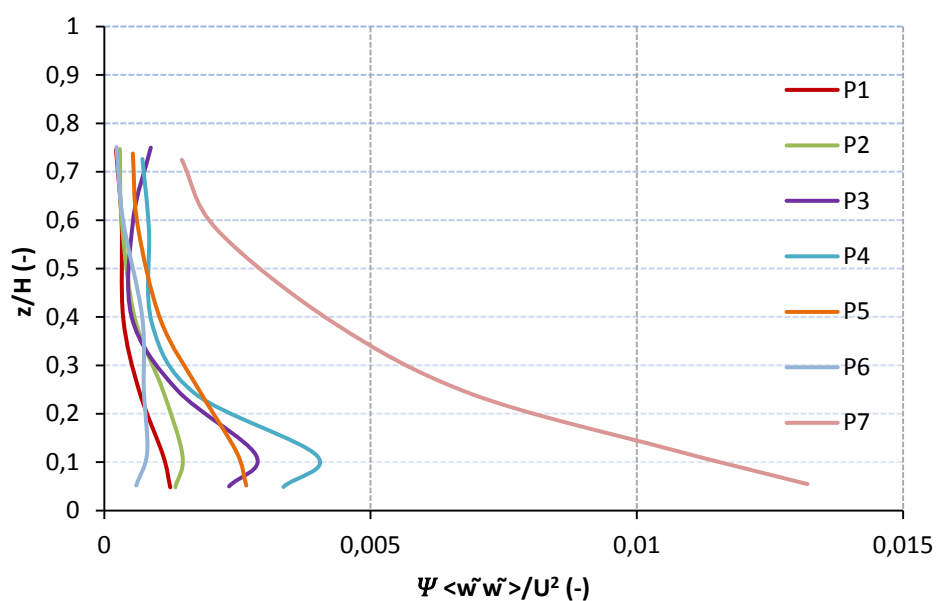


Figura 4.28 – Distribuição vertical das tensões normais dispersivas componente vertical

A partir da análise das tensões normais dispersivas da componente longitudinal é possível observar que esta é mais significativa na componente longitudinal. Apesar do seu valor, tanto na componente longitudinal como na vertical, as tensões dispersivas não podem ser desprezadas. Este facto torna-se mais evidente quanto maior for a densidade das hastes.

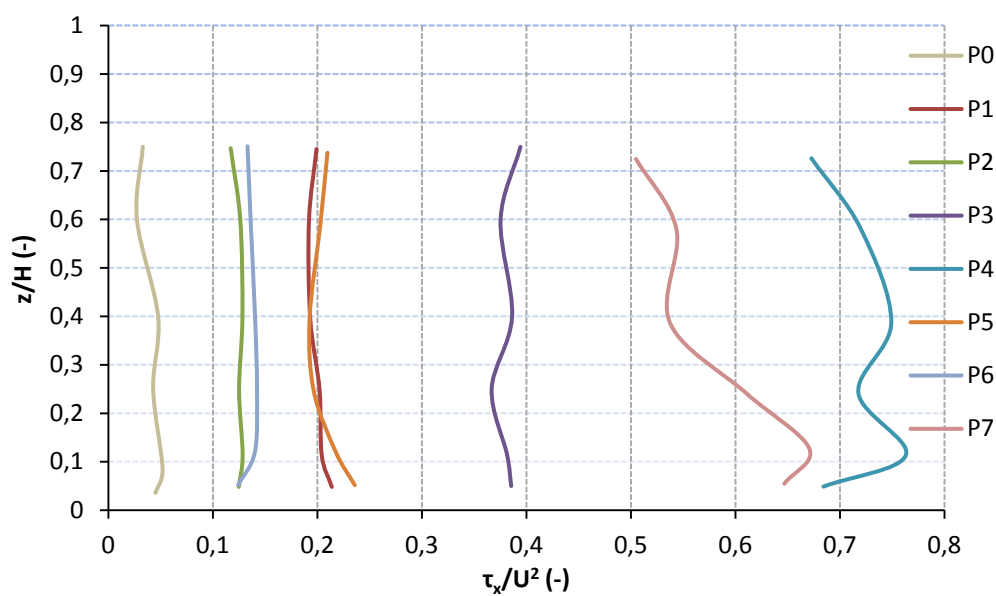


Figura 4.29 – Distribuição Vertical das tensões totais da componente longitudinal

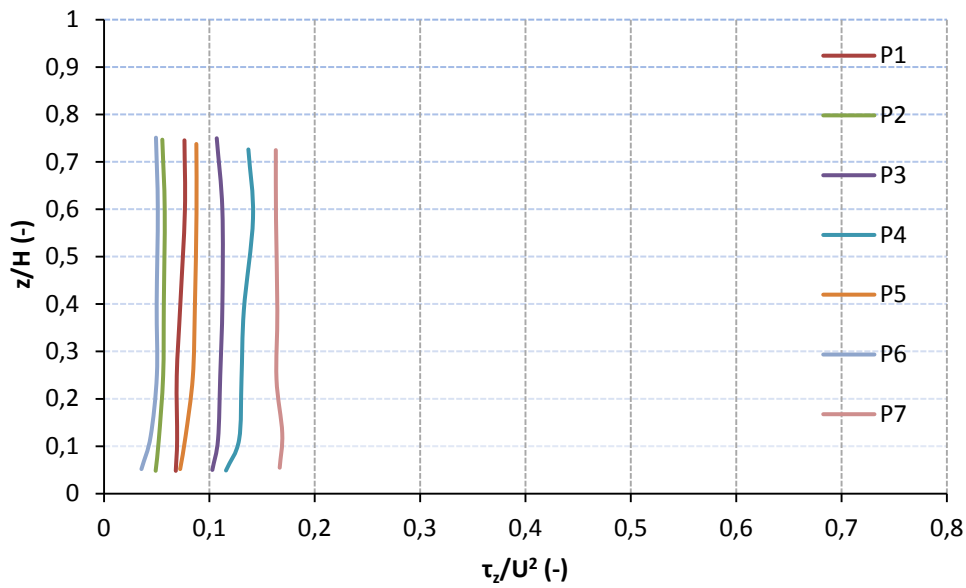


Figura 4.30 - Distribuição Vertical das tensões totais da componente vertical

Somando as tensões de Reynolds e dispersivas de cada componente, verifica-se que as tensões da componente vertical são muito menores que as da componente longitudinal, como já se tinha verificado nas análises anteriores.

4.4.2. PERFIS DE TENSÃO TANGENCIAL

Foi referido no Capítulo 3 que, ao longo do trabalho laboratorial, houve a necessidade de trocar o processador de dados. A principal consequência prática desta alteração prende-se com a impossibilidade de efetuar a análise das tensões tangenciais quando a aquisição das duas componentes não for simultânea. Essa análise é então restringida às trincheiras onde as duas componentes foram adquiridas simultaneamente, e são:

- X=8,516 m (P₁);
- X=8,669 m (P₂);
- X=8,771 m (P₃);
- X=9,025 m (P₅).

A tensão tangencial divide-se em dois tipos de tensões: as de Reynolds e as dispersivas. Estas são, respetivamente, calculadas segundo as seguintes expressões:

$$\text{Tensões tangenciais de Reynolds} = \Psi \langle \overline{u'w'} \rangle \quad (4.8)$$

e

$$\text{Tensões tangenciais dispersivas} = \Psi \langle \tilde{u}\tilde{w} \rangle \quad (4.9)$$

Os valores serão apresentados normalizados, analogamente ao procedimento efetuado para caracterizar as tensões normais, na Figura 4.31 e Figura 4.32.

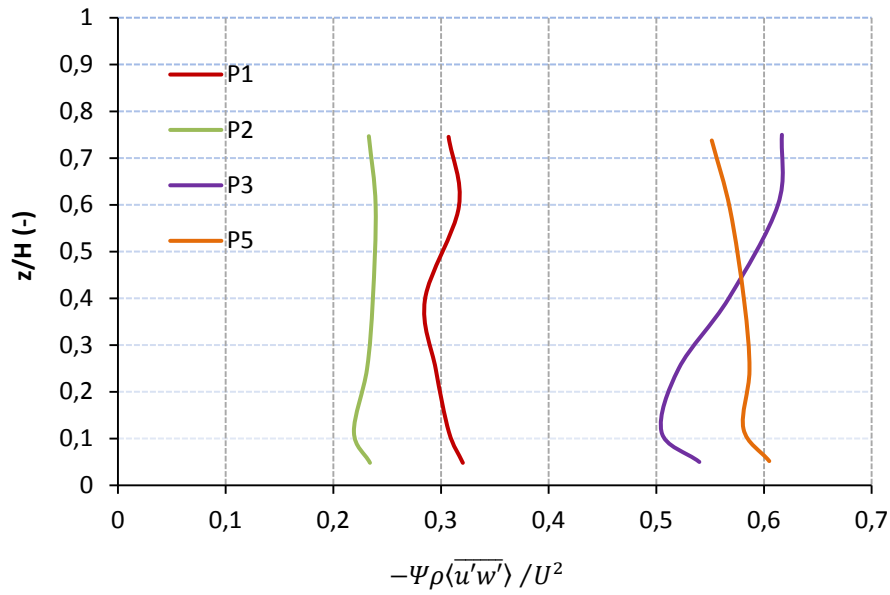


Figura 4.31 – Distribuição vertical das tensões tangenciais de Reynolds

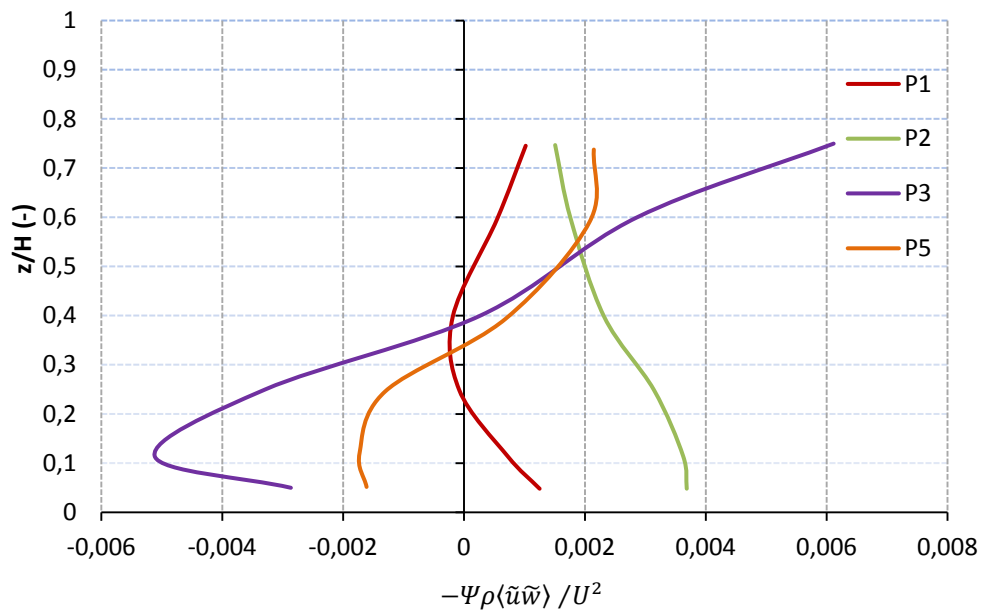


Figura 4.32 – Distribuição vertical das tensões tangenciais dispersivas

Fazendo uma análise comparativa entre as tensões de Reynolds e as dispersivas é possível concluir rapidamente que os fluxos dispersivos não podem ser desprezados face aos turbulentos, apesar destes últimos serem significativamente menores.

Verifica-se ainda que dentro das quatro zonas, a que apresenta maiores valores para as tensões tangenciais são P_3 e P_5 . Estes dois planos apresentam valores de densidade mais baixos, 1200 e 800 respetivamente, e são os planos mais a montante.

5

EFEITO DA VEGETAÇÃO NA RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO

5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Com o objetivo de quantificar a resistência imposta pela vegetação num canal natural será determinada, através das medições dos campos de velocidade e variações das alturas do escoamento, a tensão de arrastamento, no fundo do canal e nas hastes, assim como os coeficientes de resistência. Para tal recorrem-se às expressões presentes no subcapítulo 2.6 aplicadas aos valores medidos durante o trabalho laboratorial.

5.2. RESISTÊNCIA ASSOCIADA AO FUNDO

No cálculo da resistência associada ao fundo é necessário conhecimento das características do escoamento junto ao fundo, nomeadamente valores de velocidade, de forma a aplicar a Equação (2.31). Como foi referido no Capítulo 3 os pontos de medição iniciavam-se 3mm acima do leito. Esse valor foi considerado alto demais para ser considerado estar localizado na subcamada viscosa do escoamento e permitir o cálculo das tensões junto ao fundo diretamente e tornou-se necessário obter valores para a velocidade mais junto ao fundo, de forma indireta. Foi efetuada uma análise dos perfis médios no espaço e no tempo, criando uma linha de tendência que bem representasse os valores esperados junto ao leito. Após testar várias hipóteses de lei de ajuste estatístico (linear, potencial, logarítmica) em diferentes conjuntos de pontos do perfil vertical de velocidades, foi ajustada uma linha de tendência logarítmica para os três primeiros pontos de medição (3mm, 7mm e 25% da altura do escoamento).

Nas Figuras 5.1 a 5.8 encontram-se as linhas de tendências logarítmicas que se ajustam aos três pontos de cada perfil de velocidade e respetivos coeficientes de determinação.

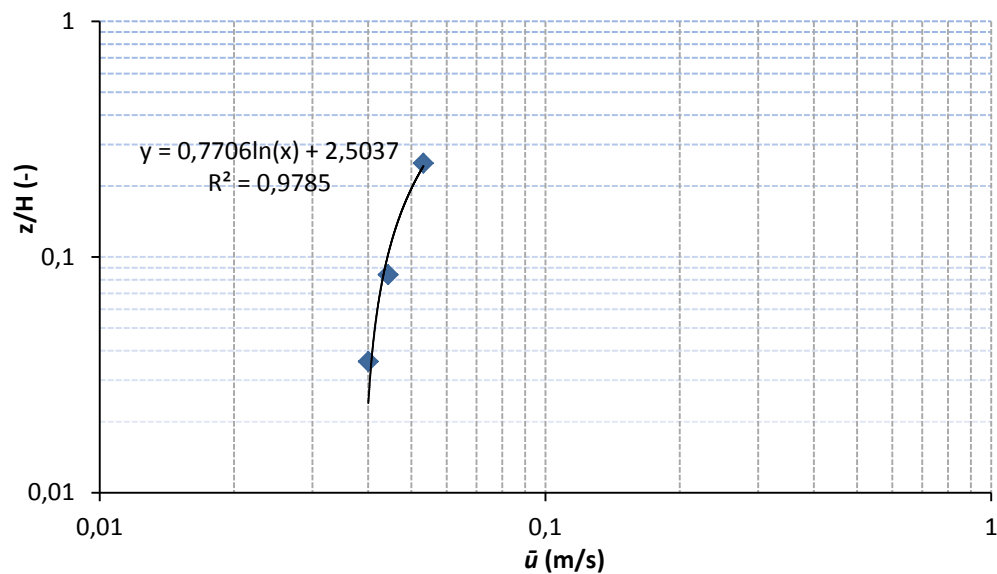


Figura 5.1 – Tendência logarítmica do perfil de velocidade em P₀

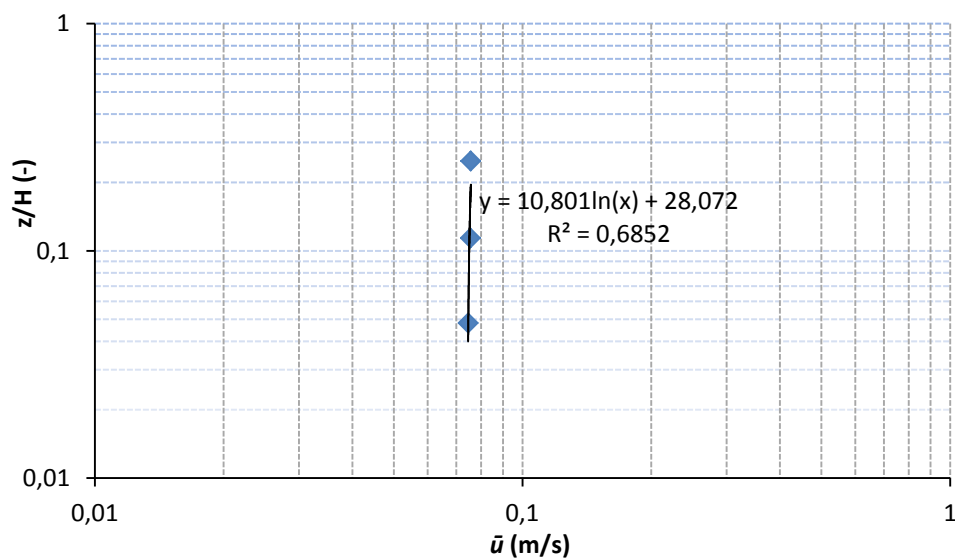
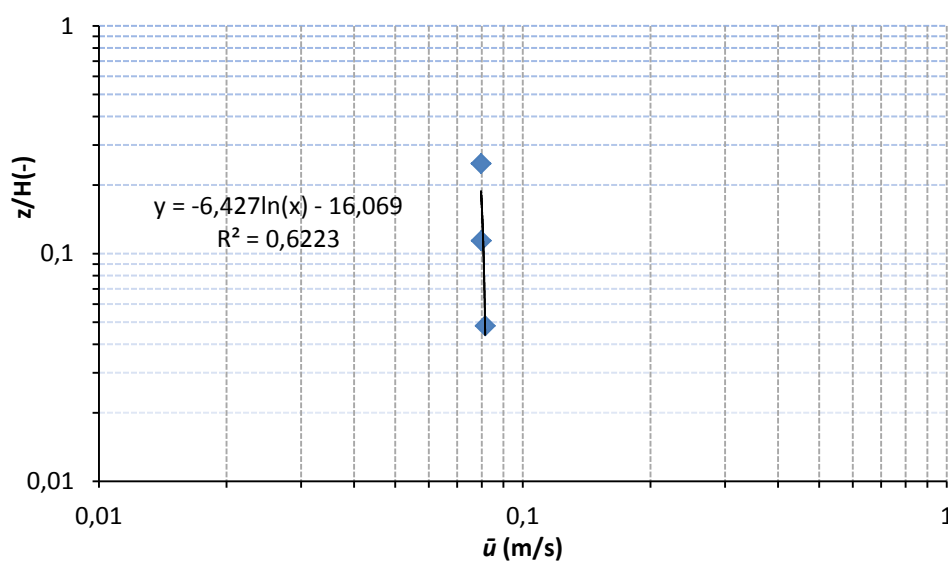
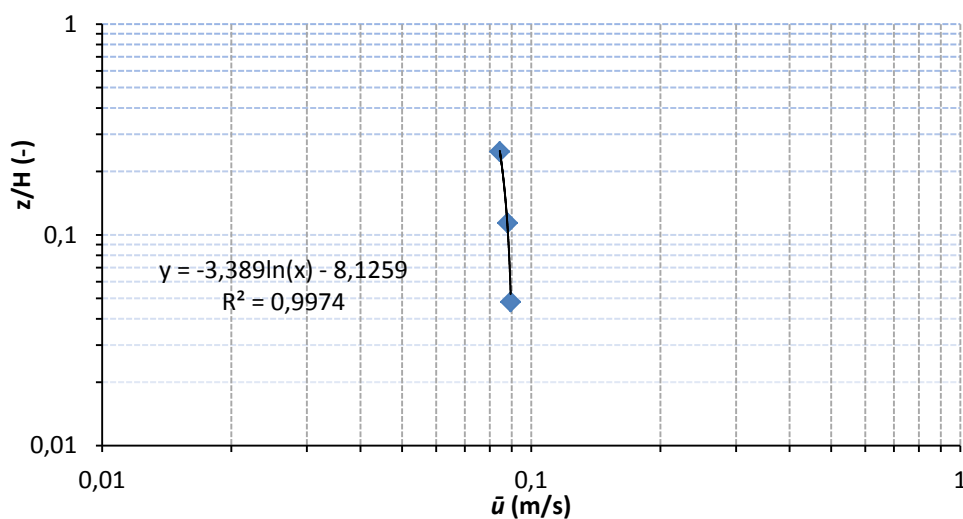


Figura 5.2 - Tendência logarítmica do perfil de velocidade em P₁

Como se pode verificar ao analisar as tendências da Figura 5.1 e Figura 5.2, a tendência aproxima-se a uma lei logarítmica, justificado pelos elevados valores de R^2 .

No caso de P₂, verifica-se que o coeficiente de determinação é relativamente mais baixo, quando comparado com os primeiros, apresentando um perfil quase vertical. Verifica-se o mesmo em P₄ e P₅, Figura 5.5 e Figura 5.6, respetivamente.

Figura 5.3 - Tendência logarítmica do perfil de velocidade em P₂Figura 5.4 - Tendência logarítmica do perfil de velocidade em P₃

Por outro lado, P₃ e P₆, apresentam valores de R^2 elevados, porém os seus perfis, Figura 5.4 e Figura 5.6 respectivamente, são o oposto do perfil teórico e apresentam valores mais elevados no fundo, o que irá traduzir em valores mais elevados junto ao leito a partir da linha de tendência.

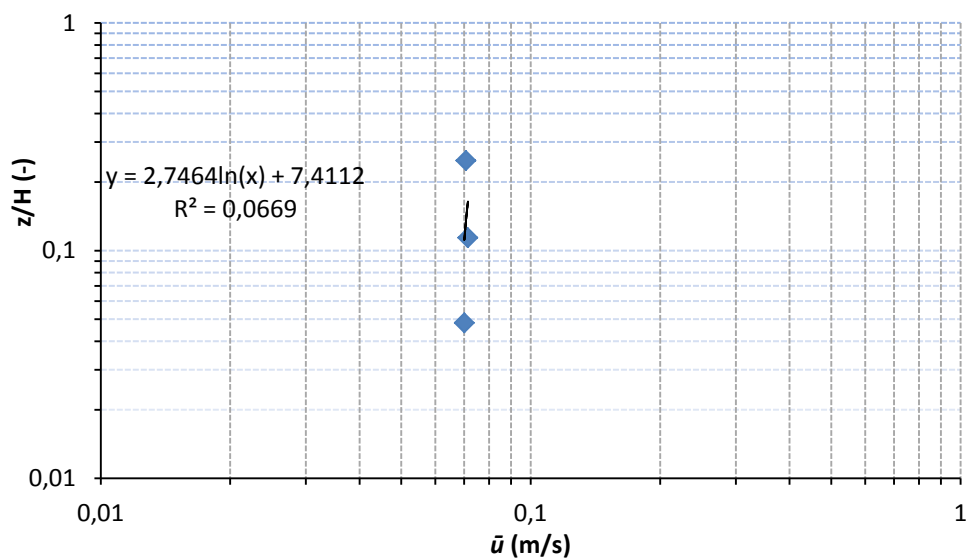


Figura 5.5 - Tendência logarítmica do perfil de velocidade em P_4

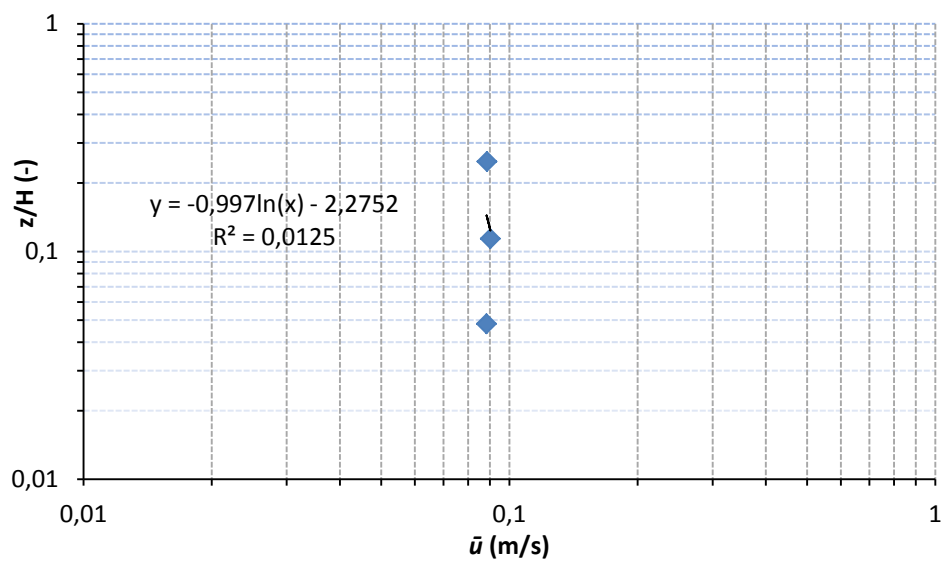
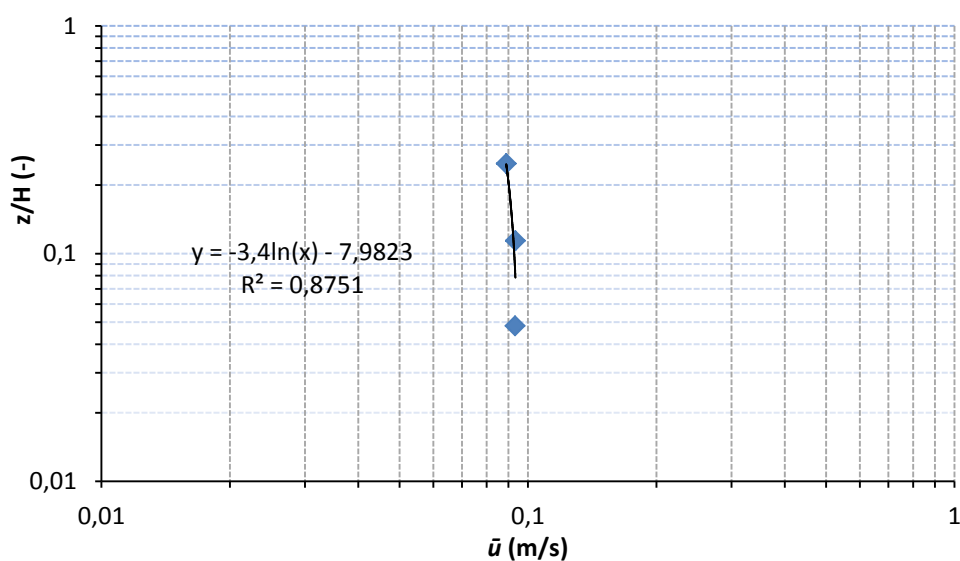
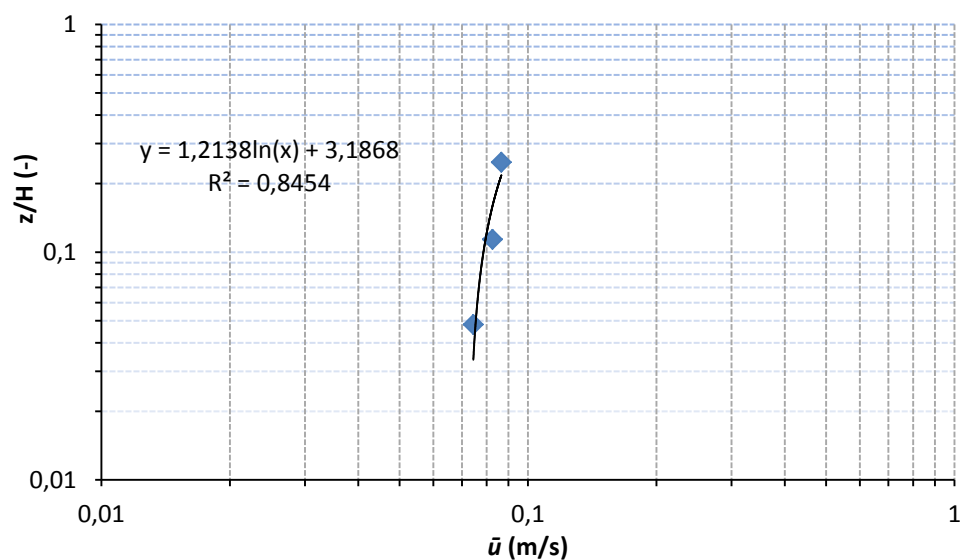


Figura 5.6 - Tendência logarítmica do perfil de velocidade em P_5

Figura 5.7 - Tendência logarítmica do perfil de velocidade em P₆

Por último, a Figura 5.8 apresenta uma boa tendência logarítmica, de P₇

Figura 5.8 - Tendência logarítmica do perfil de velocidade em P₇

Com as expressões das tendências determinadas, é possível proceder ao cálculo das tensões no leito do canal. Para tal foi usada a expressão (2.31) e a variação da componente longitudinal da velocidade foi calculada sempre em relação às mesmas alturas: 0 e 0,1 mm. Para o cálculo do coeficiente de arrastamento no fundo foi usada a Equação (2.32), culminando nos resultados presentes na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Tensão e coeficiente de arrastamento no fundo

	P ₀	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇
τ_b (Pa)	0,045	0,007	-0,012	-0,026	0,022	-0,098	-0,026	0,060
C_f	0,034	0,003	-0,005	-0,008	0,010	-0,030	-0,007	0,019

Como seria de esperar, após a análise das linhas de tendência, observa-se que as forças de arrastamento têm sentido opostos nas zonas P₂, P₃ e P₆, consequência das maiores velocidades no fundo em relação a pontos superiores. Verifica-se também que o coeficiente de arrastamento no fundo é superior no caso do escoamento sem vegetação, P₀, indo portanto de encontro às conclusões da literatura. Outro fator relevante prende-se com o facto das tensões calculadas na zona sem vegetação serem inferiores às três últimas zonas medidas. Tal pode-se dever ao facto do ponto de medição sem vegetação se encontrar a montante, onde se verificou previamente que a velocidade da componente longitudinal também seria ligeiramente inferior à existente dentro das zonas com vegetação.

Para proceder a uma análise comparativa é usada a expressão geral da fórmula de resistência, (5.1), de forma a determinar o coeficiente de resistência, λ_R e o coeficiente de Manning-Strickler, K , para escoamentos sem vegetação (Novais Barbosa, 1986):

$$\Delta H = \frac{\tau_b L}{\gamma R_h} \quad (5.1)$$

onde ΔH representa a perda de energia, τ_0 são as forças que se opõem ao movimento junto da parede, L é a distância entre secções consecutivas, γ e R_h representam o peso volúmico e raio hidráulico, respetivamente. O raio hidráulico é, por sua vez, o quociente entre a secção molhada e o perímetro molhado. Usando os valores da tensão no fundo de cada plano de medição presentes na Tabela 5.1, é possível obter o valor de $\Delta H/L$. Posteriormente é usada a relação (5.2) para determinar o coeficiente de resistência λ_R :

$$\frac{\Delta H}{L} = \frac{\lambda_R}{4R_h} \frac{U^2}{2g} \quad (5.2)$$

sendo que U é a velocidade média, no tempo e espaço, no plano de medição.

Tabela 5.2 – Determinação do coeficiente de resistência e coeficiente de Manning-Strickler para a tensão do fundo

	P ₀	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇
$\gamma \text{ (N/m}^3\text{)}$	9781,257	9792,636	9792,636	9792,636	9792,636	9792,636	9792,636	9792,636
$P_{molhado}(m)$	0,567	0,525	0,525	0,522	0,526	0,516	0,516	0,510
$S_{molhada}(m^2)$	0,033	0,025	0,025	0,024	0,025	0,023	0,023	0,022
$R_h(m)$	0,059	0,048	0,047	0,047	0,048	0,045	0,045	0,043
$\Delta H/L$	7,800E-5	1,483E-5	2,689E-5	5,736E-5	4,762E-5	2,221E-4	5,963E-5	1,417E-4
λ	0,135	0,011	0,018	0,034	0,038	0,119	0,030	0,074
$K(m^{1/3}/s)$	38,663	140,274	109,489	80,100	74,989	43,022	85,991	54,857

Foi também determinado o coeficiente de Manning-Strickler, K , para cada plano, de acordo com a expressão (5.3), (Novais Barbosa, 1986):

$$U = K R^{\frac{2}{3}} j^{1/2} \quad (5.3)$$

O coeficiente de Manning-Strickler é função da natureza das paredes e tem a vantagem de apresentar os mesmos valores em escoamentos sob pressão e de superfície livre, segundo a classificação presente na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Valores do coeficiente de Manning-Strickler, K , para vários tipos de superfície (Novais Barbosa, 1986)

Tipo de superfície	$K \text{ (m}^{1/3}/s\text{)}$
Canais de paredes revestidas a argamassa lisa	100 a 90
Canais de betão liso	80
Canais de alvenaria ordinária ou de paredes <i>gunitadas</i>	70
Canais de terra irregular, betão rugoso ou alvenaria mal cuidada	60
Canais de terra irregular com pequena vegetação ou cursos de água regulares com leito rochoso	50
Canais de terra mal cuidados ou cursos de água sobre calhaus	40

De realçar que as fronteiras no presente estudo são de dois tipos: o leito rugoso e os vidros nas paredes laterais, de modo que os coeficientes de Manning-Strickler podem não corresponder na realidade aos limites realçados na Tabela 5.3. Os valores elevados apresentados para K justificam-se pela determinação do mesmo para as tensões no fundo do canal e não as totais, que serão maiores e que terão como consequência a diminuição do seu valor, como se pode verificar na Tabela 5.8.

5.3. RESISTÊNCIA ASSOCIADA ÀS HASTES

O cálculo da resistência associada às hastes a partir da Equação (2.40) é feito por parcelas, com valores previamente obtidos no procedimento experimental e definidos na Tabela 5.4.

De realçar que a análise das forças e coeficientes de resistência é feita em relação ao ponto de medição anterior, de forma a obter a influência de um conjunto controlado de hastes nos valores calculados. Na Figura 5.9 encontra-se a planta do canal onde estão representadas as regiões com várias densidades e os planos de medição.

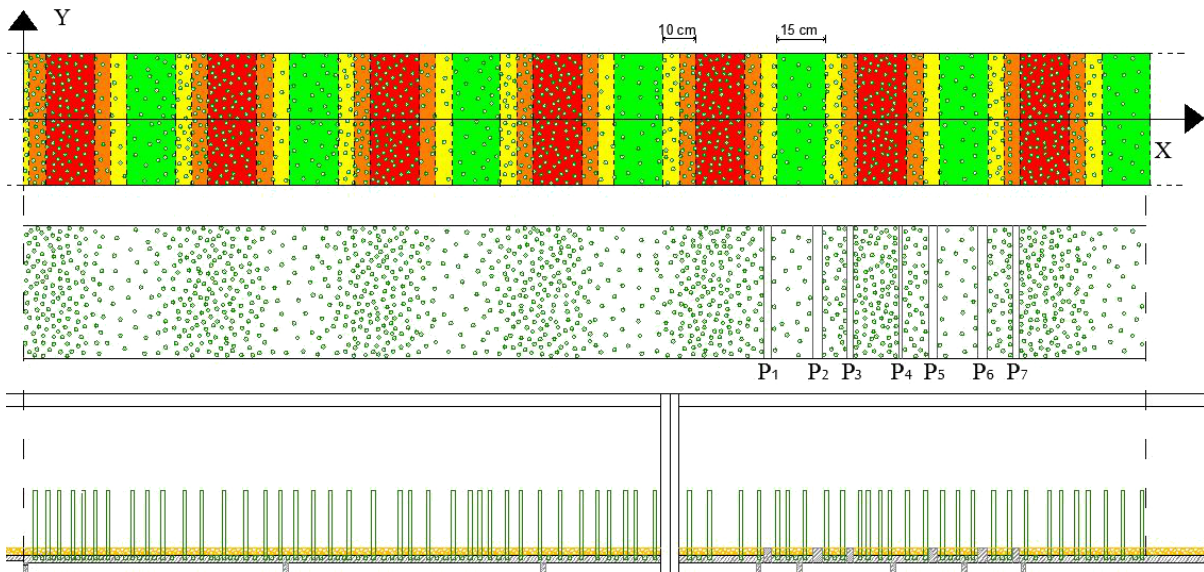


Figura 5.9 – Zonas de variação de densidade de hastes e os sete planos de medição: verde – 400 hastes/m²; amarelo – 800 hastes/m²; laranja – 1200 hastes/m²; vermelho – 1600 hastes/m²

De realçar que as zonas entre os planos P_0/P_1 , P_2/P_3 , P_4/P_5 e P_6/P_7 existe mais do que uma zona com densidade de hastes fixa, identificada com cores diferentes. Visto que a densidade de hastes é parte integrante da expressão para o cálculo da força de arrastamento média, procedeu-se à média ponderada da densidade de hastes nas zonas mencionadas. Na Tabela 5.4 os valores definidos para a densidade de hastes, n , já se encontram alterados, como se pode comprovar ao comparar com os dados presentes na Tabela 3.1.

Presente na Tabela 5.4 encontram-se presentes os valores da altura do escoamento média em cada plano de medição, $\langle \bar{H} \rangle$, a variação de altura de água em relação ao ponto de medição anterior, $\partial \langle \bar{H} \rangle / \partial x$. O valor médio na coluna de água está representado por $[\langle \bar{u} \rangle]$ que representa nada mais que a média, na vertical, do perfil médio no espaço e no tempo em cada trincheira.

Tabela 5.4 – Características do escoamento em cada plano

	P ₀	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇
n (haste/m ²)	0	891,20 ¹	400	1000	1600	1000	400	1000
$\langle \bar{H} \rangle$ (m)	0,0833	0,06238	0,06226	0,06102	0,06298	0,05795	0,05792	0,05484
$\frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x}$		-0,00824	-0,00078	-0,01216	0,01273	-0,0503	-0,0002	-0,0302
$[\langle \bar{u} \rangle]$ (m/s)		0,07090	0,07444	0,07873	0,06825	0,08103	0,08390	0,08021

Como foi referido na descrição da Equação (2.40), existem parcelas que, ao integrar na vertical, representam valores na superfície livre. Uma vez que apenas foram efetuadas medições até 75% da altura do escoamento estas parcelas serão substituídas pelos respetivos valores a 75% da altura. Esta alteração apenas foi efetuada uma vez que estas parcelas, a determinada altura, apresentavam-se relativamente constantes.

Na Tabela 5.5 encontram-se os valores da força e dos coeficientes de resistência devido às hastes. Ao analisar os valores na dita tabela, é possível concluir que P₄ apresenta todos os valores com sinal contrário aos restantes resultados. Tal advém do facto da altura de água neste plano ser superior ao plano anterior, P₃, em vez de ser inferior. Uma provável causa para esse registo pode estar relacionada com a grande densidade de hastes existente no local, dificultando a tarefa de alisamento aquando da preparação da instalação laboratorial. É, portanto, um valor sem muita utilidade no âmbito desta análise. O elevado valor da força de arrastamento de P₅ também se destaca dos restantes, e tal valor reflete a consequência da elevada altura de água registada em P₄, como se pode verificar pelo maior valor registado para $\partial \langle \bar{H} \rangle / \partial x$.

Tabela 5.5 – Forças e coeficientes de resistência das hastes

	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇
$\langle \bar{f}_x^s \rangle$ (N/m ²)	4,9465	0,4092	5,7889	-7,6504	28,6923	0,1016	14,8652
$\langle \bar{f}_D \rangle$ (N/m ²)	0,0890	0,0164	0,0949	-0,0759	0,4951	0,0044	0,2711
C_R	3,2239	0,5401	2,7875	-2,9688	13,7361	0,1134	7,6744

No geral, apresentam-se os maiores valores das forças e coeficientes de arrastamento nos casos de maior densidade de hastes, tal como seria de esperar, indo portanto de encontro às conclusões existentes na literatura, por exemplo nos trabalhos de Nepf (1999) e Tanino e Nepf (2008).

Analisando a variação dos tipos de tensões estudadas no presente subcapítulo, é possível verificar que, à medida que a densidade de hastes aumenta, a parcela das tensões a elas associada aumenta enquanto que a parcela do fundo diminui. Estudou-se de seguida a influência dos planos que apresentam valores díspares, como são os casos dos planos P₄ e P₅, removendo-os e fazendo a mesma análise para a determinação da tensão associada às hastes, uma vez que esta análise é feita comparando os vários planos de medição entre si.

¹ O valor da densidade não se apresenta como um número inteiro devido à média ponderada efetuada.

Tabela 5.6 – Características de cada plano ignorando os planos P₄ e P₅

	P ₀	P ₁	P ₂	P ₃	P ₆	P ₇
n (haste/m ²)	0	891,20	400	1000	1000	1000
$\langle \bar{H} \rangle$ (m)	0,0833	0,0624	0,0623	0,0610	0,0579	0,0548
$\partial \langle \bar{H} \rangle / dx$		-0,00824	-0,000784	-0,0122	-0,00762	-0,0302
$[\langle \bar{u} \rangle]$ (m/s)		0,0709	0,0744	0,0787	0,0839	0,0802

Ao desprezar a contribuição dos planos P₄ e P₅, P₆ irá ser analisada em relação a P₃, sendo necessário proceder à média ponderada da densidade de hastes entre estes dois planos, tal como se procedido para o caso de P₁, por exemplo.

Tabela 5.7 - Forças e coeficientes de resistência das hastes

	P ₁	P ₂	P ₃	P ₆	P ₇
$\langle \bar{f}_x^s \rangle$ (N/m ²)	4,946	0,409	5,789	4,418	14,865
$\langle \bar{f}_D \rangle$ (N/m ²)	0,089	0,016	0,095	0,076	0,271
C_R	3,224	0,540	2,787	1,974	7,674

Após esta análise verifica-se uma uniformização dos resultados. A variação no valor da tensão de arrastamento, entre zonas com igual densidade de hastes, pode dever-se a eventuais variações significativas da altura do escoamento e distância entre planos medidos.

Foi efetuada uma análise do coeficiente de Manning-Strickler, similar à anterior, para as tensões totais em todos os planos e cujos valores estão presentes na Tabela 5.8

Tabela 5.8 - Determinação do coeficiente de resistência e coeficiente de Manning-Strickler para tensões totais

	P ₀	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇
$\tau_T(Pa)$	0,045	0,096	0,029	0,121	0,098	0,593	0,031	0,331
$\Delta H/L$	7,800E-5	2,059E-4	6,223E-5	2,646E-4	2,095E-4	1,348E-3	6,960E-5	7,850E-4
λ	0,135	0,153	0,042	0,157	0,169	0,724	0,035	0,412
$K(m^{1/3}/s)$	38,663	37,642	71,967	37,295	35,751	17,465	79,595	23,310

Como é possível verificar, quando se efetua a análise dos coeficientes de Manning-Strickler para cada plano, este estudo apresenta valores inferiores quando comparado com os presentes na Tabela 5.2, apresentando-se como mais razoáveis para os valores característicos de canais naturais. Porém é de realçar os casos extremos de P₂, onde apresenta um valor elevado para o presente caso característico para canais de alvenaria, e os casos de P₅ e P₇ cujos valores não se encontram entre os valores de referência da Tabela 5.3.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Na presente dissertação procurou-se caracterizar e quantificar a resistência hidráulica imposta por vegetação emersa e rígida através da realização de um trabalho laboratorial onde se mediam os valores instantâneos da velocidade, no espaço entre hastes, com recurso à técnica não intrusiva do *Laser-Doppler Anemometry*. Mediu-se, ainda, parâmetros macroscópicos do escoamento como a altura do escoamento e a topografia do fundo. Os campos de velocidade instantânea capturados pelo *LDA* foram transformados em velocidade média temporal e demais grandezas turbulentas médias, como as tensões de Reynolds e tensões dispersivas.

Os perfis médios temporais foram selecionados para a aplicação da metodologia DAM, através da qual se quantificaram os perfis médios temporais e espaciais, concluindo os seguintes aspetos:

- A heterogeneidade do escoamento encontra-se concentrada junto às hastes e às suas esteiras, de forma que a definição dos pontos de medição deve ser mais cuidadosa quanto menor a densidade de hastes, sendo que a turbulência gerada pela vegetação é tanto maior quanto a sua densidade;
- As tensões dispersivas não são desprezáveis, em relação às de Reynolds, e os seus valores encontram-se ampliados com o aumento da densidade de hastes, sendo que as tensões dispersivas expressam a influência do leito no escoamento até ao nível $Z/h=0,4$ após o qual se mantêm constantes;
- A altura do escoamento apresenta-se dependente da densidade de hastes existente;
- Verifica-se que a existência de vegetação diminui a tensão de arrastamento no fundo, e esta é tanto maior quanto mais densa for a zona com vegetação.

O conjunto de ensaios laboratoriais realizado nesta dissertação foi restrito e existe, portanto, a necessidade de dar continuidade a este tema sendo recomendável:

- Caracterizar o escoamento no plano transversal;
- Caracterizar experimentalmente um escoamento com hastes flexíveis;
- Determinação dos coeficientes de arrastamento com densidade de hastes constante mas diâmetros variáveis;
- Caracterizar mais pormenorizadamente o escoamento junto ao leito.

Os resultados presentes neste trabalho podem servir como base de comparação para futuros trabalhos laboratoriais a desenvolver.

BIBLIOGRAFIA

- [1] <http://anewscafe.com/wp-content/uploads/2011/07/Sacto-River.jpg>. 24/03/2013
- [2] <http://catchments.nerc.ac.uk/projects/vegetation/index.asp?cookieConsent=A>. 24/03/2013
- Albrecht, Heinz-Eberhard. 2010. *Laser doppler and phase doppler measurement techniques*. Berlin ; New York: Springer.
- Belcher, S. E., N. Jerram e J. C. R. Hunt. 2003. "Adjustment of a turbulent boundary layer to a canopy of roughness elements." *Journal of Fluid Mechanics* no. 488:369-398. Acedido a 2003. <http://dx.doi.org/10.1017/S0022112003005019>. doi: doi:10.1017/S0022112003005019.
- Campbell, L.J. 2005. *Double-averaged Open-channel Flow Over Regular Rough Beds*. Aberdeen University.
- Chow, Ven Te. 1973. *Open-channel hydraulics*. Vol. International ed 0009. Auckland [etc.]: McGraw-Hill Book Company.
- Dantec Dynamics. "Educational slide shows". Acedido a Julho de 2013. <http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=455>.
- Dantec Dynamics. "Measurement principles of LDA". Acedido a Fevereiro de 2013. <http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=1046>.
- Fernandes, Pedro Miguel Campos. 2012. *Estudo experimental de escoamentos em canais com vegetação*. Editado por Rodrigo Jorge Fonseca de Oliveira Maia e João Pedro Gomes Moreira Pêgo. Porto: FEUP.
- Ferreira, Rui M. L. 2005. "River Morphodynamics and Sediment Transport. Conceptual Model and Solutions". Ph.D. Thesis, Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa.
- Ferreira, Rui M. L., Ana M. Ricardo e Mário J. J. Franca. 2009. "Discussion of "Laboratory Investigation of Mean Drag in a Random Array of Rigid, Emergent Cylinders" by Yukie Tanino and Heidi M. Nepf." *Journal of Hydraulic Engineering* no. 135 (8):690-693. <http://ejournals.ebsco.com/direct.asp?ArticleID=4C908193D973C550F036>.
- Finnigan, J. J. 1985. "Turbulent Transport in Flexible Plant Canopies." Em *The Forest-Atmosphere Interaction*, editado por B. A. Hutchison e B. B. Hicks, 443-480. Springer Netherlands.
- Finnigan, John. 2000. "Turbulence in Plant Canopies." *Annual Review of Fluid Mechanics* no. 32 (1):519-571. <http://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.fluid.32.1.519>. doi: doi:10.1146/annurev.fluid.32.1.519.
- Franca, Mário J., Rui M. L. Ferreira e Ulrich Lemmin. 2008. "Parameterization of the logarithmic layer of double-averaged streamwise velocity profiles in gravel-bed river flows." *Advances in Water Resources* no. 31 (6):915-925. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0309170808000377>. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2008.03.001>.
- Franca, Mário J., Rui M.L. Ferreira, João Leal e Ulrich Lemmin. 2010. Aplicação da Metodologia de Dupla-Média Espaço-Temporal na Análise de Escoamentos Fluviais sobre Leito de Seixo Rolado. Em *10º Congresso da Água - Marcas d'Água*.

- Giménez-Curto, Luis A. e Miguel A. Corniero Lera. 1996. "Oscillating turbulent flow over very rough surfaces." *Journal of Geophysical Research: Oceans* no. 101 (C9):20745-20758. <http://dx.doi.org/10.1029/96JC01824>. doi: 10.1029/96JC01824.
- Hinze, J. O. 1975. *Turbulence*. Vol. 2nd ed 0009. New York: McGraw Hill.
- Kadlec, Robert. 1990. "Overland Flow in Wetlands: Vegetation Resistance." *Journal of Hydraulic Engineering* no. 116 (5):691. [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(1990\)116:5\(691\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(1990)116:5(691)). doi: citeulike-article-id:10419877
doi: 10.1061/(asce)0733-9429(1990)116:5(691).
- Liu, D., P. Diplas, C. C. Hodges e J. D. Fairbanks. 2010. "Hydrodynamics of flow through double layer rigid vegetation." *Geomorphology* no. 116 (3-4):286-296. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X0900511X>. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.11.024>.
- Lopez, Fabian e Marcelo H. Garcia. 2001. "Mean Flow and Turbulence Structure of Open-Channel Flow Through Non-Emergent Vegetation." *Journal of Hydraulic Engineering* no. 127 (5):392. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=4400513&lang=pt-br&site=ehost-live>.
- Lory, João Pedro Sobrinho. 2011. "Estudo laboratorial de escoamentos em leitos com vegetação", Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade Nova de Lisboa.
- Massey, Bernard Stanford. 2002. *Mecânica dos Fluidos*. Lisboa.
- Naot, Dan e Ieshisa Nezu. 1996. "Hydrodynamic behavior of partly vegetated open channels." *Journal of Hydraulic Engineering* no. 122 (11):625. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=9709224794&lang=pt-br&site=ehost-live>.
- Nepf, H. M. 1999. "Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation." *Water Resources Research* no. 35 (2):479-489. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0032893451&partnerID=40&md5=bded6813bb2ac26eb247f619cd91bc43>. doi: citeulike-article-id:10717673
10.1029/1998WR900069.
- Nepf, H. M. e E. R. Vivoni. 2000. "Flow structure in depth-limited, vegetated flow." *Journal of Geophysical Research: Oceans* no. 105 (C12):28547-28557. <http://dx.doi.org/10.1029/2000JC900145>. doi: 10.1029/2000JC900145.
- Nepf, Heidi M. 2011. "Flow and Transport in Regions with Aquatic Vegetation." *Annual Review of Fluid Mechanics* no. 44 (1):123-142. Acedido a 2013/05/15. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-fluid-120710-101048>. doi: 10.1146/annurev-fluid-120710-101048.
- Nepf, Heidi M. 2012. "Hydrodynamics of vegetated channels." *Journal of Hydraulic Research* no. 50 (3):262-279. Acedido a 2013/05/15. <http://dx.doi.org/10.1080/00221686.2012.696559>. doi: 10.1080/00221686.2012.696559.
- Nezu, I. e H. Nakagawa. 1993. "Turbulence in Open Channel Flow."

- Nikora, Vladimir. 2007. "Hydrodynamics of aquatic ecosystems: spatial-averaging perspective." *Acta Geophysica* no. 55 (1):3-10. <http://dx.doi.org/10.2478/s11600-006-0043-6>. doi: 10.2478/s11600-006-0043-6.
- Nikora, Vladimir e Derek Goring. 2001. "Spatially Averaged Open-Channel Flow Over Rough Bed." *Journal of Hydraulic Engineering* no. 127 (2):123. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=4083395&lang=pt-br&site=ehost-live>.
- Nikora, Vladimir, Katinka Koll, Ian McEwan, Stephen McLean e Andreas Ditttrich. 2004. "Velocity Distribution in the Roughness Layer of Rough-Bed Flows." *Journal of Hydraulic Engineering* no. 130 (10):1036-1042. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=14603815&lang=pt-br&site=ehost-live>. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:10(1036).
- Nikora, Vladimir, Scott Larned, Nina Nikora, Koustuv Debnath, Glenn Cooper e Michael Reid. 2008. "Hydraulic Resistance due to Aquatic Vegetation in Small Streams: Field Study." *Journal of Hydraulic Engineering* no. 134 (9):1326-1332. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=33835751&lang=pt-br&site=ehost-live>. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:9(1326).
- Nikora, Vladimir, Ian McEwan, Stephen McLean, Stephen Coleman, Dubravka Pokrajac e Roy Walters. 2007. "Double-Averaging Concept for Rough-Bed Open-Channel and Overland Flows: Theoretical Background." *Journal of Hydraulic Engineering* no. 133 (8):873-883. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=25762158&lang=pt-br&site=ehost-live>. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:8(873).
- Nikora, Vladimir, Stephen McLean, Stephen Coleman, Dubravka Pokrajac, Ian McEwan, Lorna Campbell, Jochen Aberle, Dougal Clunie e Katinka Koll. 2007. "Double-Averaging Concept for Rough-Bed Open-Channel and Overland Flows: Applications." *Journal of Hydraulic Engineering* no. 133 (8):884-895. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=25762157&lang=pt-br&site=ehost-live>. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:8(884).
- Novais Barbosa. 1985. *Mecânica dos Fluidos e Hidráulica Geral* Vol. 1: Porto Editora LDA.
- Novais Barbosa. 1986. *Mecânica dos Fluidos e Hidráulica Geral* Vol. 2: Porto Editora LDA.
- Pokrajac, Dubravka, Ian McEwan e Vladimir Nikora. 2008. "Spatially averaged turbulent stress and its partitioning." *Experiments in Fluids* no. 45 (1):73-83. <http://dx.doi.org/10.1007/s00348-008-0463-y>. doi: 10.1007/s00348-008-0463-y.
- Pope, Stephen B. 2001. *Turbulent flows*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Raupach, M. R. 1992. "Drag and drag partition on rough surfaces." *Boundary-Layer Meteorology* no. 60 (4):375-395. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00155203>. doi: 10.1007/BF00155203.
- Raupach, M. R., R. A. Antonia e S. Rajagopalan. 1991. "Rough-Wall Turbulent Boundary Layers." *Applied Mechanics Reviews* no. 44 (1):1-25. <http://dx.doi.org/10.1115/1.3119492>. doi: 10.1115/1.3119492.
- Raupach, M. R. e R. H. Shaw. 1982. "Averaging procedures for flow within vegetation canopies." *Boundary-Layer Meteorology* no. 22 (1):79-90. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00128057>. doi: 10.1007/BF00128057.

- Ricardo, Ana Margarida da Costa. 2008. *Caracterização do escoamento turbulento em canais com vegetação emersa rígida. Aplicação ao estudo da resistência hidráulica*. Editado por Rui Miguel Lage Ferreira e Mario Jorge Rodrigues Pereira de Franca. Lisboa: IST.
- Smith, J. Dungan e S. R. McLean. 1977. "Spatially averaged flow over a wavy surface." *Journal of Geophysical Research* no. 82 (12):1735-1746. <http://dx.doi.org/10.1029/JC082i012p01735>. doi: 10.1029/JC082i012p01735.
- Tanino, Yukie e Heidi M. Nepf. 2008. "Laboratory Investigation of Mean Drag in a Random Array of Rigid, Emergent Cylinders." *Journal of Hydraulic Engineering* no. 134 (1):34-41. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=27926415&lang=pt-br&site=ehost-live>. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:1(34).
- Tennekes, H. 1972. *Turbulência em fluidos*. Editado por John L. Lumley. Manuais universitários 0011. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian. Serviço de Educação e Bolsas.
- Thompson, A e B. Wilson. 2002. *The impact of roughness elements on reducing the shear stress acting on soil particles*. St. Paul, Minnesota: Final Report MN/RC - 2002-22, University of Minnesota.
- Thompson, A. M., B. N. Wilson e B. J. Hansen. 2004. "Shear stress partitioning for idealized vegetated surfaces." *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* no. 47 (3):701-709. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-4243067198&partnerID=40&md5=ada627b40740d0a97e58e76772414877>.
- Wang, H. e E.S. Tackle. 1994. "Boundary-layer flow and turbulence near porous obstacles, 1. Derivation of a general equation set for a porous medium." *Boundary-Layer Meteorology* no. 74:73-88.
- Wilson, N. Robert e Roger H. Shaw. 1977. "A Higher Order Closure Model for Canopy Flow." *Journal of Applied Meteorology* no. 16 (11):1197-1205. Acedido a 2013/08/19. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450\(1977\)016<1197:AHOCMF>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450(1977)016<1197:AHOCMF>2.0.CO;2). doi: 10.1175/1520-0450(1977)016<1197:AHOCMF>2.0.CO;2.
- Yen, Ben Chie. 2002. "Open Channel Flow Resistance." *Journal of Hydraulic Engineering* no. 128 (1):20. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=5931099&lang=pt-br&site=ehost-live>.
- Zhang, Zhengji. 2010. *LDA Application Methods: Laser Doppler Anemometry for Fluid Dynamics*. Berlin: Springer-Verlag.

ANEXOS

ANEXO A

Integração Vertical das DANS

Este anexo destina-se a apresentar as expressões para o cálculo da força de arrastamento devido às hastes apresentada no Capítulo 2 através da passagem da expressão (2.34) para a (2.38).

No âmbito das DANS, a expressão (2.34) apresenta a componente longitudinal para escoamentos permanentes.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle \bar{u} \rangle^2}{\partial x} = & g \frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x} - \frac{\partial \langle \bar{u}'^2 \rangle}{\partial x} - \frac{\partial \langle \tilde{u}^2 \rangle}{\partial x} - \frac{\partial \langle \bar{u}' w' \rangle}{\partial z} - \frac{\partial \langle \tilde{u} \tilde{w} \rangle}{\partial z} \\ & + \frac{1}{\rho V_f} \iint_{S_{int}} \bar{p} n_x dS - \frac{1}{\rho V_f} \iint_{S_{int}} v \frac{\partial \bar{u}}{\partial x_i} n_i dS \end{aligned} \quad (1)$$

Como foi referido, a parcela da viscosidade será desprezada e portanto o integral, na direção vertical, da componente longitudinal virá:

$$\begin{aligned} \int_0^H \frac{\partial \langle \bar{u} \rangle^2}{\partial x} dz = & \int_0^H g \frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x} dz - \int_0^H \frac{\partial \langle \bar{u}'^2 \rangle}{\partial x} dz - \int_0^H \frac{\partial \langle \tilde{u}^2 \rangle}{\partial x} dz \\ & - \int_0^H \frac{\partial \langle \bar{u}' w' \rangle}{\partial z} dz - \int_0^H \frac{\partial \langle \tilde{u} \tilde{w} \rangle}{\partial z} dz \\ & + \int_0^H \left(\frac{1}{\rho V_f} \iint_{S_{int}} \bar{p} n_x dS \right) dz \\ & - \int_0^H \left(\frac{1}{\rho V_f} \iint_{S_{int}} v \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} n_j dS \right) dz \end{aligned} \quad (2)$$

Integrando os termos um a um vem:

$$\begin{aligned} \int_0^H \frac{\partial \langle \bar{u} \rangle^2}{\partial x} dz = & \frac{\partial}{\partial x} \int_0^H \langle \bar{u} \rangle^2 dz - \frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x} \langle \bar{u} \rangle^2 \Big|_H = \frac{\partial \langle \bar{H} \rangle [\langle \bar{u} \rangle^2]}{\partial x} - \frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x} \langle \bar{u} \rangle^2 \Big|_H \\ = & \langle \bar{H} \rangle \frac{\partial [\langle \bar{u} \rangle^2]}{\partial x} + [\langle \bar{u} \rangle^2] \frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x} - \frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x} \langle \bar{u} \rangle^2 \Big|_H \end{aligned} \quad (3)$$

$$\int_0^H g \frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x} dz = g \frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x} \bar{H} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 \int_0^H \frac{\partial \langle \bar{u}'^2 \rangle}{\partial x} dz &= \frac{\partial}{\partial x} \int_0^H \langle \bar{u}'^2 \rangle dz - \frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x} \langle \bar{u}'^2 \rangle \Big|_H \\
 &= \frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x} \left[\langle \bar{u}'^2 \rangle \right] - \frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x} \langle \bar{u}'^2 \rangle \Big|_H \\
 &= \langle \bar{H} \rangle \frac{\partial \left[\langle \bar{u}'^2 \rangle \right]}{\partial x} + \left[\langle \bar{u}'^2 \rangle \right] \frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x} - \frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x} \langle \bar{u}'^2 \rangle \Big|_H
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 \int_0^H \frac{\partial \langle \tilde{u}^2 \rangle}{\partial x} dz &= \frac{\partial}{\partial x} \int_0^H \langle \tilde{u}^2 \rangle dz - \frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x} \langle \tilde{u}^2 \rangle \Big|_H = \frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x} \left[\langle \tilde{u}^2 \rangle \right] - \frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x} \langle \tilde{u}^2 \rangle \Big|_H \\
 &= \langle \bar{H} \rangle \frac{\partial \left[\langle \tilde{u}^2 \rangle \right]}{\partial x} + \left[\langle \tilde{u}^2 \rangle \right] \frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x} - \frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x} \langle \tilde{u}^2 \rangle \Big|_H
 \end{aligned} \tag{6}$$

$$\int_0^H \frac{\partial \langle \bar{u}' \bar{w}' \rangle}{\partial z} dz = \langle \bar{u}' \bar{w}' \rangle \Big|_H - \langle \bar{u}' \bar{w}' \rangle \Big|_0 \tag{7}$$

$$\int_0^H \frac{\partial \langle \tilde{u} \tilde{w} \rangle}{\partial z} dz = \langle \tilde{u} \tilde{w} \rangle \Big|_H - \langle \tilde{u} \tilde{w} \rangle \Big|_0 \tag{8}$$

$$\int_0^H \left(\frac{1}{\rho V_f} \iint_{S_{int}} \bar{p} n_j dS \right) dz = \frac{1}{\rho} \langle \bar{f}_x^s \rangle \tag{9}$$

$$\int_0^H \left(\frac{1}{\rho V_f} \iint_{S_{int}} \bar{p} n_x dS \right) dz = \frac{1}{\rho} \langle \bar{f}_x^{(bv)} \rangle \tag{10}$$

A sua forma final ficaria:

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{\rho g \langle \bar{H} \rangle} \langle \bar{f}_x^s \rangle &= - \frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x} \left(1 + \left(\frac{1}{g \frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x}} \left(\frac{\partial [\langle \bar{u}^2 \rangle]}{\partial x} \right) + \frac{[\langle \bar{u}^2 \rangle]}{g \langle \bar{H} \rangle} - \frac{\langle \bar{u}^2 \rangle \Big|_H}{\langle \bar{H} \rangle} \right) \right. \\
 &\quad + \left(\frac{1}{g \frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x}} \left(\frac{\partial [\langle \bar{u}'^2 \rangle]}{\partial x} \right) + \frac{[\langle \bar{u}'^2 \rangle]}{g \langle \bar{H} \rangle} - \frac{\langle \bar{u}'^2 \rangle \Big|_H}{g \langle \bar{H} \rangle} \right) \\
 &\quad \left. + \left(\frac{1}{g \frac{\partial \langle \bar{H} \rangle}{\partial x}} \left(\frac{\partial [\langle \tilde{u}^2 \rangle]}{\partial x} \right) + \frac{[\langle \tilde{u}^2 \rangle]}{g \langle \bar{H} \rangle} - \frac{\langle \tilde{u}^2 \rangle \Big|_H}{g \langle \bar{H} \rangle} \right) \right) - \frac{\langle \bar{f}_x^{(bv)} \rangle}{\rho g \langle \bar{H} \rangle}
 \end{aligned} \tag{11}$$

De referir que o último termo do lado direito da equação é desprezado, como foi referido, e uma vez que a força de arrastamento apresenta o sentido oposto ao escoamento introduz-se o sinal negativo à expressão anterior.

ANEXO B

Valores referentes às DANS

O Efeito da Vegetação na Resistência ao Escoamento em Canais Naturais

\bar{u} (m/s)

X=5976 mm

	-150	-140	-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
3	0,022	0,041	0,024	0,023	0,024	0,044	0,047	0,042	0,044	0,045	0,047	0,032	0,039	0,040	0,041	0,046	0,044	0,045	0,046	0,045	0,045	0,044	0,045	0,045	0,045	0,044	0,045	0,044	0,041	0,029	0,032
7	0,025	0,044	0,015	0,026	0,025	0,048	0,051	0,049	0,049	0,051	0,051	0,042	0,043	0,046	0,046	0,048	0,050	0,050	0,050	0,050	0,049	0,050	0,049	0,049	0,050	0,049	0,049	0,045	0,046	0,038	0,040
20,83	0,046	0,056	0,031	0,033	0,036	0,058	0,060	0,059	0,059	0,060	0,059	0,057	0,057	0,059	0,058	0,058	0,059	0,058	0,059	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,056	0,053	0,048	0,047	0,042	0,041
33,32	0,052	0,055	0,055	0,021	0,039	0,061	0,062	0,061	0,062	0,062	0,062	0,062	0,060	0,061	0,062	0,061	0,062	0,061	0,060	0,060	0,060	0,059	0,058	0,058	0,058	0,058	0,052	0,050	0,051	0,040	0,042
49,98	0,058	0,060	0,060	0,046	0,058	0,061	0,062	0,062	0,062	0,062	0,063	0,063	0,062	0,063	0,062	0,062	0,062	0,062	0,061	0,061	0,061	0,060	0,059	0,059	0,058	0,058	0,049	0,050	0,049	0,045	0,042
62,48	0,059	0,059	0,059	0,060	0,060	0,061	0,061	0,061	0,062	0,062	0,063	0,062	0,063	0,064	0,064	0,063	0,063	0,062	0,061	0,061	0,061	0,060	0,059	0,059	0,058	0,057	0,056	0,053	0,044	0,039	0,035

X=8516 mm

	-150	-140	-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
3	0,063	0,053	0,047	0,066	0,062	0,056	0,059	0,055	0,072	0,069	0,068	0,066	0,062	0,070	0,068	0,042	0,071	0,063	0,092	0,074	0,052	0,112	0,047	0,048	0,090	0,083	0,088	0,086	0,058	0,100	0,095
7,1	0,065	0,057	0,049	0,062	0,065	0,047	0,057	0,057	0,071	0,075	0,068	0,065	0,073	0,064	0,073	0,054	0,095	0,073	0,090	0,075	0,051	0,112	0,053	0,057	0,089	0,086	0,079	0,083	0,044	0,083	0,090
15,5	0,047	0,054	0,055	0,065	0,066	0,056	0,059	0,055	0,072	0,069	0,068	0,066	0,062	0,070	0,068	0,064	0,096	0,075	0,086	0,080	0,053	0,113	0,056	0,061	0,088	0,084	0,081	0,084	0,050	0,081	0,087
24,8	0,066	0,057	0,064	0,064	0,060	0,057	0,060	0,063	0,069	0,075	0,068	0,068	0,067	0,066	0,076	0,068	0,080	0,082	0,089	0,082	0,052	0,110	0,051	0,062	0,088	0,082	0,082	0,089	0,052	0,079	0,086
37,2	0,051	0,068	0,062	0,064	0,064	0,055	0,063	0,062	0,063	0,073	0,070	0,064	0,066	0,069	0,071	0,060	0,071	0,086	0,090	0,084	0,061	0,109	0,050	0,059	0,087	0,083	0,082	0,085	0,056	0,079	0,089
46,5	0,056	0,072	0,077	0,068	0,060	0,051	0,065	0,065	0,074	0,077	0,075	0,069	0,075	0,079	0,077	0,084	0,077	0,086	0,090	0,084	0,063	0,110	0,051	0,052	0,088	0,084	0,085	0,086	0,055	0,081	0,091

X=8669 mm

	-150	-140	-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
3	0,072	0,069	0,068	0,056	0,073	0,086	0,095	0,082	0,050	0,085	0,089	0,088	0,086	0,042	0,075	0,099	0,097	0,083	0,063	0,076	0,083	0,076	0,073	0,084	0,082	0,042	0,060	0,074	0,075	0,080	0,069
7,1	0,068	0,069	0,067	0,056	0,071	0,086	0,094	0,082	0,050	0,084	0,088	0,088	0,084	0,041	0,073	0,097	0,094	0,079	0,060	0,070	0,083	0,076	0,072	0,083	0,085	0,045	0,060	0,071	0,070	0,075	0,066
15,5	0,066	0,063	0,068	0,056	0,066	0,084	0,091	0,079	0,052	0,084	0,088	0,087	0,085	0,051	0,075	0,094	0,093	0,078	0,054	0,064	0,081	0,075	0,072	0,085	0,085	0,042	0,058	0,078	0,080	0,083	0,066
24,8	0,063	0,072	0,069	0,056	0,065	0,084	0,093	0,084	0,052	0,082	0,091	0,088	0,086	0,054	0,074	0,097	0,092	0,078	0,051	0,064	0,081	0,074	0,073	0,086	0,085	0,045	0,062	0,071	0,068	0,084	0,071
37,2	0,050	0,078	0,075	0,058	0,066	0,084	0,093	0,084	0,054	0,084	0,092	0,088	0,086	0,059	0,075	0,093	0,093	0,077	0,053	0,065	0,079	0,072	0,073	0,088	0,086	0,046	0,063	0,076	0,075	0,078	0,068
46,5	0,070	0,076	0,076	0,055	0,064	0,084	0,090	0,085	0,060	0,083	0,091	0,089	0,087	0,060	0,076	0,088	0,091	0,079	0,053	0,067	0,080	0,073	0,074	0,087	0,086	0,045	0,064	0,075	0,077	0,078	0,069

O Efeito da Vegetação na Resistência ao Escoamento em Canais Naturais

X=8771 mm

	-150	-140	-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
3	0,104	0,112	0,048	0,006	0,127	0,038	0,097	0,124	0,068	0,078	0,083	0,114	0,099	0,057	0,064	0,123	0,085	0,094	0,078	0,101	0,096	0,092	0,082	0,034	0,066	0,095	0,097	0,017	0,095	0,101	0,091
7,1	0,084	0,112	0,044	0,017	0,120	0,019	0,097	0,121	0,059	0,079	0,084	0,111	0,093	0,060	0,040	0,108	0,120	0,094	0,073	0,097	0,096	0,094	0,086	0,036	0,074	0,095	0,099	0,025	0,099	0,093	0,094
15,5	0,068	0,102	0,057	0,006	0,121	0,009	0,104	0,117	0,059	0,085	0,086	0,105	0,089	0,059	0,035	0,104	0,077	0,084	0,070	0,096	0,092	0,092	0,086	0,037	0,075	0,088	0,093	0,033	0,103	0,097	0,091
24,8	0,064	0,106	0,058	0,002	0,115	-0,004	0,094	0,112	0,052	0,083	0,086	0,105	0,087	0,063	0,039	0,114	0,074	0,089	0,059	0,095	0,091	0,088	0,083	0,029	0,071	0,083	0,093	0,035	0,105	0,093	0,093
37,2	0,065	0,107	0,060	0,011	0,114	0,013	0,095	0,110	0,058	0,083	0,093	0,103	0,085	0,062	0,048	0,109	0,073	0,091	0,053	0,097	0,096	0,104	0,078	0,024	0,064	0,080	0,089	0,035	0,103	0,096	0,089
46,5	0,067	0,105	0,065	0,021	0,115	0,018	0,099	0,116	0,063	0,093	0,092	0,106	0,086	0,059	0,047	0,109	0,107	0,098	0,052	0,097	0,102	0,104	0,078	0,015	0,044	0,085	0,089	0,036	0,036	0,101	0,090

X=8925 mm

	-150	-140	-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
3	0,078	0,102	0,028	0,140	0,040	0,098	0,075	0,030	0,085	0,074	0,088	0,017	0,112	0,040	0,047	0,036	0,020	0,059	0,107	0,122	0,049	0,077	0,013	0,077	0,061	0,020	0,087	0,043	0,102	0,080	0,000
7,1	0,084	0,097	0,013	0,133	0,031	0,099	0,075	0,026	0,084	0,079	0,092	0,010	0,109	0,027	0,050	0,051	0,020	0,056	0,097	0,113	0,047	0,119	0,044	0,082	0,070	0,047	0,108	0,022	0,106	0,068	0,013
15,5	0,073	0,089	0,019	0,134	0,044	0,103	0,066	0,035	0,090	0,080	0,085	0,005	0,070	0,046	0,063	0,044	0,025	0,062	0,093	0,101	0,018	0,109	0,058	0,081	0,063	0,052	0,105	0,027	0,121	0,072	0,009
24,8	0,092	0,082	0,019	0,135	0,037	0,106	0,073	0,036	0,093	0,087	0,093	0,015	0,106	0,046	0,063	0,050	0,032	0,054	0,097	0,100	0,025	0,108	0,056	0,078	0,072	0,060	0,109	0,030	0,126	0,094	0,004
37,2	0,091	0,082	0,026	0,133	0,044	0,107	0,073	0,057	0,089	0,088	0,094	0,023	0,105	0,026	0,066	0,041	0,034	0,058	0,102	0,098	0,022	0,111	0,047	0,078	0,068	0,051	0,103	0,041	0,129	0,106	0,024
46,5	0,083	0,085	0,035	0,134	0,042	0,107	0,075	0,045	0,090	0,086	0,087	0,021	0,081	0,057	0,071	0,050	0,035	0,058	0,096	0,105	0,032	0,107	0,042	0,079	0,065	0,048	0,108	0,050	0,121	0,111	0,017

X=9025 mm

	-150	-140	-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
3	0,098	0,124	0,074	0,065	0,107	0,091	0,086	0,087	0,089	0,065	0,009	0,084	0,111	0,099	0,103	0,095	0,090	0,051	0,073	0,082	0,019	0,071	0,107	0,087	0,101	0,084	0,075	0,075	0,060	0,085	0,084
7,1	0,097	0,125	0,071	0,066	0,109	0,095	0,096	0,096	0,088	0,077	0,022	0,094	0,111	0,096	0,101	0,097	0,092	0,057	0,079	0,074	0,020	0,073	0,103	0,085	0,103	0,083	0,075	0,075	0,058	0,078	0,088
15,5	0,092	0,114	0,074	0,071	0,104	0,094	0,092	0,092	0,082	0,081	0,029	0,089	0,106	0,087	0,097	0,096	0,093	0,062	0,075	0,079	0,031	0,081	0,101	0,085	0,103	0,084	0,072	0,071	0,045	0,069	0,086
24,8	0,091	0,113	0,078	0,076	0,103	0,090	0,088	0,086	0,076	0,080	0,034	0,094	0,102	0,080	0,093	0,095	0,092	0,058	0,065	0,085	0,043	0,084	0,101	0,081	0,099	0,085	0,074	0,067	0,036	0,066	0,086
37,2	0,091	0,115	0,078	0,081	0,104	0,090	0,090	0,083	0,075	0,077	0,036	0,092	0,102	0,082	0,094	0,095	0,093	0,050	0,052	0,084	0,046	0,084	0,100	0,078	0,096	0,083	0,071	0,064	0,026	0,062	0,088
46,5	0,091	0,115	0,079	0,082	0,105	0,091	0,092	0,085	0,075	0,075	0,037	0,090	0,103	0,081	0,091	0,096	0,093	0,048	0,049	0,086	0,047	0,085	0,100	0,078	0,096	0,084	0,070	0,062	0,023	0,061	0,091

O Efeito da Vegetação na Resistência ao Escoamento em Canais Naturais

X=9178 mm

	-150	-140	-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
3	0,106	0,107	0,107	0,084	0,089	0,100	0,085	0,078	0,086	0,086	0,079	0,077	0,068	0,085	0,097	0,104	0,087	0,039	0,092	0,093	0,105	0,104	0,054	0,093	0,088	0,081	0,081	0,068	0,084	0,085	0,078
7,1	0,115	0,113	0,110	0,081	0,087	0,101	0,086	0,076	0,087	0,086	0,080	0,072	0,059	0,086	0,098	0,107	0,081	0,036	0,092	0,095	0,106	0,099	0,051	0,090	0,092	0,087	0,089	0,072	0,081	0,094	0,071
15,5	0,110	0,106	0,104	0,075	0,083	0,099	0,080	0,068	0,085	0,083	0,077	0,071	0,058	0,084	0,095	0,106	0,081	0,042	0,088	0,088	0,100	0,094	0,049	0,082	0,083	0,081	0,086	0,061	0,068	0,090	0,070
24,8	0,108	0,102	0,101	0,075	0,071	0,099	0,085	0,069	0,085	0,085	0,079	0,072	0,063	0,084	0,092	0,106	0,081	0,042	0,088	0,088	0,100	0,094	0,049	0,082	0,083	0,081	0,086	0,063	0,065	0,091	0,075
37,2	0,108	0,101	0,098	0,075	0,075	0,102	0,086	0,071	0,087	0,087	0,080	0,074	0,063	0,086	0,092	0,107	0,083	0,040	0,085	0,086	0,098	0,095	0,053	0,084	0,084	0,081	0,087	0,064	0,066	0,090	0,087
46,5	0,106	0,099	0,097	0,078	0,074	0,101	0,085	0,071	0,087	0,086	0,081	0,076	0,064	0,087	0,092	0,109	0,090	0,043	0,085	0,087	0,100	0,096	0,054	0,086	0,085	0,083	0,088	0,066	0,065	0,085	0,085

X=9280 mm

	-150	-140	-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
3	0,071	0,112	0,085	0,076	0,070	0,119	0,018	0,004	0,121	0,073	0,127	0,079	0,076	0,056	0,068	0,035	0,063	0,121	0,078	0,008	0,016	0,097	0,086	0,022	0,086	0,108	0,020	0,039	0,103	0,041	0,055
7,1	0,080	0,112	0,090	0,082	0,082	0,116	0,002	0,056	0,145	0,049	0,123	0,093	0,082	0,069	0,094	0,053	0,085	0,131	0,095	0,030	0,020	0,087	0,088	0,040	0,083	0,101	0,023	0,045	0,110	0,051	0,048
15,5	0,085	0,109	0,079	0,084	0,078	0,118	0,018	0,113	0,154	0,064	0,127	0,096	0,084	0,059	0,073	0,035	0,096	0,122	0,093	0,058	0,045	0,098	0,056	0,017	0,094	0,105	0,043	0,056	0,114	0,065	0,043
24,8	0,085	0,106	0,088	0,127	0,072	0,100	0,014	0,098	0,150	0,074	0,126	0,095	0,089	0,079	0,078	0,061	0,089	0,104	0,100	0,081	0,076	0,109	0,056	0,031	0,089	0,107	0,060	0,059	0,110	0,072	0,048
37,2	0,085	0,102	0,075	0,126	0,097	0,106	0,012	0,101	0,151	0,074	0,125	0,099	0,090	0,086	0,049	0,048	0,082	0,104	0,095	-0,003	0,075	0,113	0,064	0,035	0,096	0,108	0,072	0,064	0,107	0,071	0,056
46,5	0,091	0,108	0,083	0,131	0,104	0,106	0,024	0,110	0,152	0,077	0,128	0,104	0,086	0,081	0,045	0,056	0,076	0,099	0,092	0,094	0,089	0,108	0,079	0,034	0,103	0,107	0,078	0,068	0,108	0,068	0,054

O Efeito da Vegetação na Resistência ao Escoamento em Canais Naturais

$$\bar{u}'\bar{u}' \times 10^{-3} (m/s)$$

X=5976 mm

	-150	-140	-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
3	0,058	0,068	0,023	0,023	0,026	0,052	0,048	0,073	0,051	0,065	0,054	0,105	0,080	0,088	0,071	0,051	0,072	0,061	0,065	0,059	0,066	0,064	0,065	0,059	0,051	0,052	0,047	0,058	0,057	0,065	0,069
7	0,070	0,051	0,042	0,023	0,024	0,048	0,042	0,063	0,062	0,057	0,054	0,116	0,107	0,085	0,070	0,042	0,058	0,050	0,044	0,052	0,055	0,048	0,056	0,052	0,042	0,040	0,039	0,052	0,049	0,070	0,072
20,83	0,134	0,037	0,035	0,025	0,047	0,034	0,063	0,043	0,035	0,037	0,039	0,138	0,063	0,049	0,051	0,032	0,030	0,035	0,026	0,027	0,028	0,029	0,031	0,029	0,026	0,026	0,024	0,050	0,059	0,073	0,073
33,32	0,115	0,095	0,084	0,036	0,102	0,029	0,090	0,037	0,030	0,032	0,053	0,064	0,041	0,029	0,032	0,027	0,023	0,026	0,023	0,024	0,024	0,024	0,030	0,025	0,025	0,026	0,029	0,038	0,035	0,079	0,086
49,98	0,049	0,047	0,022	0,095	0,033	0,030	0,097	0,028	0,029	0,029	0,051	0,027	0,034	0,031	0,029	0,029	0,024	0,026	0,028	0,027	0,028	0,026	0,025	0,027	0,026	0,025	0,048	0,039	0,041	0,071	0,089
62,48	0,118	0,095	0,032	0,026	0,024	0,048	0,137	0,030	0,031	0,031	0,030	0,027	0,033	0,030	0,033	0,036	0,024	0,029	0,029	0,028	0,030	0,028	0,029	0,028	0,025	0,025	0,024	0,039	0,064	0,071	0,057

X=8516 mm

	-150	-140	-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
3	0,063	0,053	0,047	0,066	0,062	0,056	0,059	0,055	0,072	0,069	0,068	0,066	0,062	0,070	0,068	0,042	0,071	0,063	0,092	0,074	0,052	0,112	0,047	0,048	0,090	0,083	0,088	0,086	0,058	0,100	0,095
7,1	0,065	0,057	0,049	0,062	0,065	0,047	0,057	0,057	0,071	0,075	0,068	0,065	0,073	0,064	0,073	0,054	0,095	0,073	0,090	0,075	0,051	0,112	0,053	0,057	0,089	0,086	0,079	0,083	0,044	0,083	0,090
15,5	0,047	0,054	0,055	0,065	0,066	0,056	0,059	0,055	0,072	0,069	0,068	0,066	0,062	0,070	0,068	0,064	0,096	0,075	0,086	0,080	0,053	0,113	0,056	0,061	0,088	0,084	0,081	0,084	0,050	0,081	0,087
24,8	0,066	0,057	0,064	0,064	0,060	0,057	0,060	0,063	0,069	0,075	0,068	0,068	0,067	0,066	0,076	0,068	0,080	0,082	0,089	0,082	0,052	0,110	0,051	0,062	0,088	0,082	0,082	0,089	0,052	0,079	0,086
37,2	0,051	0,068	0,062	0,064	0,064	0,055	0,063	0,062	0,063	0,073	0,070	0,064	0,066	0,069	0,071	0,060	0,071	0,086	0,090	0,084	0,061	0,109	0,050	0,059	0,087	0,083	0,082	0,085	0,056	0,079	0,089
46,5	0,056	0,072	0,077	0,068	0,060	0,051	0,065	0,065	0,074	0,077	0,075	0,069	0,075	0,079	0,077	0,084	0,077	0,086	0,090	0,084	0,063	0,110	0,051	0,052	0,088	0,084	0,085	0,086	0,055	0,081	0,091

X=8669 mm

	-150	-140	-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
3	0,453	0,514	0,452	0,552	0,404	0,303	0,602	1,085	1,347	0,730	0,276	0,247	0,704	1,513	0,919	0,618	0,221	0,392	0,449	0,383	0,305	0,253	0,212	0,282	0,473	0,852	0,504	0,557	0,704	0,444	0,313
7,1	0,524	0,525	0,655	0,509	0,449	0,322	0,600	1,141	1,410	0,708	0,346	0,259	0,626	1,507	0,940	0,652	0,233	0,468	0,451	0,429	0,331	0,276	0,244	0,287	0,505	0,855	0,517	0,564	0,732	0,591	0,275
15,5	0,603	0,619	0,398	0,623	0,515	0,342	0,593	1,035	1,295	0,795	0,379	0,261	0,603	1,353	0,857	0,643	0,279	0,510	0,504	0,434	0,425	0,302	0,253	0,306	0,506	0,807	0,658	0,543	0,414	0,437	0,263
24,8	0,535	0,548	0,581	0,646	0,569	0,374	0,576	1,057	1,297	0,790	0,380	0,245	0,622	1,317	0,851	0,619	0,330	0,518	0,575	0,532	0,459	0,331	0,271	0,315	0,510	0,840	0,528	0,554	0,657	0,406	0,357
37,2	0,536	0,463	0,616	0,676	0,606	0,398	0,540	0,970	1,180	0,780	0,367	0,249	0,544	1,234	0,864	0,798	0,362	0,571	0,587	0,526	0,470	0,332	0,276	0,329	0,538	0,817	0,495	0,534	0,590	0,532	0,277
46,5	0,432	0,422	0,587	0,684	0,637	0,428	0,533	0,882	1,093	0,736	0,357	0,243	0,506	1,133	0,685	0,861	0,364	0,541	0,634	0,502	0,444	0,338	0,257	0,341	0,543	0,818	0,460	0,481	0,490	0,619	0,306

O Efeito da Vegetação na Resistência ao Escoamento em Canais Naturais

X=8771 mm

	-150	-140	-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
3	1,034	0,945	1,866	2,549	1,282	3,234	2,414	1,178	2,375	2,997	2,791	1,125	0,821	1,688	1,845	2,329	1,129	1,556	1,893	1,031	1,189	1,355	1,526	2,200	1,500	0,944	1,362	1,976	2,081	1,354	1,696
7,1	1,331	0,983	1,835	2,385	1,444	3,245	1,900	1,276	2,227	2,747	2,513	1,066	0,838	1,596	2,169	2,296	1,636	1,559	1,758	1,183	1,065	1,088	1,305	2,216	1,218	0,786	1,222	2,259	1,883	2,079	1,325
15,5	1,675	1,009	1,707	2,652	1,256	3,847	2,170	1,298	2,519	2,433	2,285	1,102	0,850	1,535	2,054	2,327	0,984	1,342	1,637	0,969	0,975	0,954	1,198	2,095	0,929	0,729	1,099	2,227	1,925	1,653	1,275
24,8	1,797	1,110	1,912	2,838	1,679	3,145	2,089	1,455	2,455	2,235	2,181	1,252	0,920	1,671	2,271	2,307	1,126	1,483	2,033	0,905	1,001	1,004	1,259	2,097	1,025	0,757	1,104	2,153	1,948	1,706	1,325
37,2	1,878	1,268	2,074	2,929	1,704	4,005	2,151	1,533	2,432	2,196	2,178	1,220	0,899	1,678	2,154	2,373	1,233	1,599	2,113	0,999	0,990	0,733	1,332	2,101	1,073	0,792	1,099	2,149	1,877	1,472	1,384
46,5	1,735	1,112	2,086	3,086	1,708	4,013	2,357	1,347	2,462	2,170	2,323	1,199	0,840	1,585	2,088	2,210	1,842	1,650	2,347	1,021	0,938	0,791	1,382	2,046	1,300	0,792	1,116	1,856	1,856	1,241	1,437

X=8925 mm

	-150	-140	-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
3	1,759	1,514	3,889	2,740	3,739	1,987	1,896	3,677	1,697	1,035	1,550	2,930	3,466	2,292	1,731	0,512	2,105	2,131	1,577	2,498	1,858	2,263	1,690	1,544	1,882	1,668	1,980	2,355	4,456	2,876	1,584
7,1	2,078	1,896	3,898	3,314	3,496	2,015	1,908	4,178	2,005	1,338	1,897	3,498	3,984	2,843	2,034	0,472	2,229	1,717	1,461	2,526	2,091	2,261	2,451	1,257	1,848	2,157	2,191	3,294	4,929	3,553	2,333
15,5	2,167	2,326	3,576	2,892	3,287	1,441	1,778	3,702	1,659	1,624	1,956	3,274	3,387	3,225	1,939	0,463	2,176	1,741	1,368	2,757	2,774	2,234	2,270	1,478	1,948	2,050	2,330	3,532	4,169	3,987	2,747
24,8	2,303	2,629	3,453	3,576	3,223	1,724	1,895	3,709	1,685	1,475	1,986	3,672	3,891	3,453	1,995	0,459	2,279	1,942	1,585	3,216	3,285	2,694	2,562	1,697	2,048	2,318	2,227	3,785	4,193	3,270	2,633
37,2	2,120	2,678	3,485	3,072	3,454	1,783	2,085	3,101	1,528	1,493	2,043	3,487	4,165	2,834	2,108	0,418	2,361	2,152	1,617	3,141	3,085	2,474	2,499	1,594	2,005	2,294	2,147	3,708	4,156	2,993	3,334
46,5	2,053	2,661	3,576	3,271	3,237	1,666	2,020	3,402	1,476	1,586	2,000	3,221	3,170	3,195	2,252	0,455	2,107	2,003	1,439	3,020	2,885	2,116	2,326	1,726	1,874	2,180	1,971	3,353	3,748	2,918	3,302

X=9025 mm

	-150	-140	-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
3	0,575	1,151	1,898	1,773	1,125	0,752	0,634	0,526	0,723	1,775	2,319	1,879	0,900	0,500	0,403	0,372	0,813	1,249	1,528	1,612	2,109	1,893	0,996	0,550	0,345	0,902	0,773	0,773	1,460	1,226	1,049
7,1	0,590	1,154	1,762	1,878	1,098	0,693	0,605	0,519	0,587	1,492	2,163	1,621	0,862	0,515	0,498	0,387	0,723	1,166	1,350	1,449	1,850	1,582	0,952	0,539	0,362	0,990	0,791	0,791	1,330	1,123	0,937
15,5	0,555	1,193	1,340	1,454	1,065	0,655	0,606	0,526	0,548	1,204	1,899	1,459	0,952	0,575	0,555	0,437	0,712	1,055	1,202	1,275	1,669	1,399	0,946	0,588	0,454	0,975	0,774	1,397	1,918	1,261	0,975
24,8	0,607	1,221	1,215	1,254	0,975	0,660	0,652	0,592	0,614	1,170	1,768	1,537	0,974	0,667	0,593	0,468	0,828	1,200	1,402	1,210	1,540	1,373	0,971	0,627	0,560	0,881	0,949	1,274	1,754	1,271	0,955
37,2	0,763	1,217	1,220	1,203	0,955	0,673	0,659	0,607	0,675	1,241	1,759	1,482	1,008	0,669	0,639	0,535	0,834	1,361	1,530	1,368	1,449	1,319	0,924	0,626	0,631	0,959	0,945	1,130	1,601	1,302	0,993
46,5	0,813	1,276	1,197	1,191	0,978	0,664	0,637	0,623	0,675	1,213	1,725	1,437	0,982	0,695	0,669	0,586	0,885	1,515	1,707	1,597	1,461	1,278	0,918	0,619	0,578	0,914	0,973	1,064	1,627	1,363	0,923

O Efeito da Vegetação na Resistência ao Escoamento em Canais Naturais

X=9178 mm

	-150	-140	-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
3	0,939	0,524	0,383	1,560	1,034	0,789	0,780	1,036	0,597	0,634	0,773	0,757	0,888	0,355	0,284	0,526	1,049	2,151	0,549	0,235	0,277	0,702	1,530	0,745	0,356	0,317	0,420	0,611	0,445	0,423	0,675
7,1	0,894	0,456	0,392	1,767	1,188	0,906	0,843	1,328	0,649	0,694	0,712	0,845	0,941	0,406	0,408	0,624	1,402	2,051	0,597	0,255	0,267	0,849	1,460	0,813	0,373	0,336	0,404	0,552	0,629	0,348	0,717
15,5	1,237	0,609	0,484	1,941	1,159	1,097	0,951	1,518	0,674	0,722	0,633	0,726	0,896	0,423	0,416	0,621	1,301	1,791	0,656	0,327	0,350	0,836	1,357	0,848	0,425	0,409	0,541	0,766	0,779	0,420	0,633
24,8	1,302	0,623	0,545	1,665	1,455	1,187	0,942	1,511	0,689	0,694	0,647	0,732	0,824	0,386	0,413	0,621	1,301	1,791	0,656	0,327	0,350	0,836	1,357	0,848	0,425	0,409	0,587	0,765	0,798	0,461	0,714
37,2	1,151	0,488	0,523	1,518	1,406	1,231	0,886	1,431	0,671	0,632	0,632	0,664	0,832	0,342	0,405	0,601	1,245	1,989	0,739	0,372	0,445	0,867	1,201	0,934	0,477	0,415	0,583	0,736	0,807	0,460	0,539
46,5	1,107	0,458	0,537	1,356	1,282	1,121	0,822	1,351	0,659	0,604	0,602	0,663	0,854	0,317	0,395	0,566	1,071	2,035	0,812	0,349	0,356	0,867	1,274	0,938	0,504	0,419	0,618	0,770	0,852	0,754	0,674

X=9280 mm

	-150	-140	-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
3	4,487	2,615	2,578	1,953	4,453	4,324	4,438	3,481	3,705	3,926	3,328	4,358	3,474	4,001	3,073	2,365	2,174	2,254	4,081	2,448	4,408	2,628	4,018	0,542	3,566	2,860	4,019	3,291	2,702	2,712	2,707
7,1	4,293	3,051	2,655	2,195	3,987	4,153	4,193	6,257	4,094	5,292	3,903	4,619	3,457	4,666	2,890	3,637	2,200	2,089	3,541	2,949	4,201	4,036	4,636	0,844	4,106	2,677	3,451	3,134	2,523	2,997	2,664
15,5	3,707	3,014	2,695	1,841	3,460	3,933	4,454	5,074	2,047	5,114	3,815	4,032	3,494	3,863	3,104	3,323	2,020	1,843	2,583	2,671	3,522	3,567	1,925	4,723	3,788	2,457	3,150	2,829	2,308	2,913	2,222
24,8	3,445	2,851	2,480	1,895	3,179	3,702	3,893	4,655	1,832	4,827	3,711	4,212	3,260	3,182	3,661	4,196	1,808	1,763	1,698	2,510	2,883	2,863	1,608	4,435	3,099	2,203	2,881	2,586	2,138	2,575	2,312
37,2	3,360	3,069	2,621	2,024	2,224	3,404	4,218	4,591	1,510	4,422	3,487	3,783	3,494	3,346	3,768	3,380	2,061	1,811	1,411	1,081	2,090	2,240	1,176	4,398	3,060	1,940	2,412	2,399	1,989	2,547	2,183
46,5	3,611	3,151	2,652	1,939	2,130	3,252	4,288	4,884	1,561	4,150	3,268	3,918	3,081	3,632	3,306	3,592	2,333	1,935	1,526	1,707	1,927	2,762	0,914	4,606	3,163	1,850	2,172	2,084	1,975	2,400	2,019

O Efeito da Vegetação na Resistência ao Escoamento em Canais Naturais

$$\bar{w} \times 10^{-2} (m/s)$$

X=8516 mm

	-150	-140	-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
3	0,216	-0,106	0,365	0,120	0,270	0,306	0,258	0,166	0,100	0,233	0,373	0,020	0,112	0,232	0,163	0,149	0,226	0,381	-0,831	-0,088	0,421	0,029	-0,352	0,274	0,502	0,477	0,214	-0,148	0,405	0,281	0,174
7,1	0,077	-0,168	0,606	0,174	0,086	0,321	0,258	0,132	0,075	0,182	0,235	-0,024	0,020	0,170	0,037	0,045	0,212	0,136	-0,699	-0,220	0,172	0,153	-0,280	0,220	0,515	0,542	0,288	-0,107	0,278	0,193	0,100
15,5	0,282	-0,160	0,026	-0,035	0,018	0,306	0,258	0,166	0,100	0,233	0,373	0,020	0,112	0,232	0,163	0,035	0,090	0,004	-0,324	-0,282	0,074	0,059	-0,128	0,161	0,360	0,498	0,404	0,027	-0,099	0,134	-0,018
24,8	0,038	-0,027	-0,083	0,017	-0,035	0,158	0,134	0,119	0,084	0,029	0,057	0,071	0,059	0,084	0,071	-0,028	-0,095	-0,082	-0,256	-0,338	-0,095	0,099	0,056	0,135	0,297	0,309	0,265	0,016	-0,175	0,044	-0,056
37,2	0,032	-0,149	-0,085	0,030	-0,029	0,036	0,140	-0,050	-0,028	-0,017	-0,044	-0,079	-0,066	0,007	0,095	-0,053	-0,103	-0,047	-0,321	-0,408	-0,121	0,120	0,212	0,070	0,193	0,049	0,090	-0,231	0,028	0,129	-0,043
46,5	0,051	0,021	-0,086	-0,088	0,040	0,046	0,033	-0,080	-0,104	-0,099	-0,041	-0,065	-0,045	-0,051	-0,075	-0,014	-0,091	-0,112	-0,141	-0,320	-0,164	0,050	0,200	0,146	0,057	-0,013	0,043	-0,198	0,198	0,067	0,059

X=8669 mm

	-150	-140	-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
3	0,565	-0,085	-0,067	0,327	-0,091	-0,325	-0,663	-0,347	-0,010	-0,500	-0,096	0,168	-0,330	-0,028	-0,329	-0,098	-0,053	-0,188	0,375	0,015	-0,485	-0,189	0,013	-0,396	-0,428	0,459	-0,034	-0,108	-0,028	-0,485	-0,125
7,1	0,768	0,055	-0,041	0,414	-0,155	-0,373	-0,522	-0,441	-0,032	-0,265	-0,083	0,033	-0,396	-0,163	-0,208	-0,157	-0,079	-0,211	0,529	0,116	-0,620	-0,288	-0,042	-0,358	-0,257	0,338	0,026	-0,084	-0,032	-0,394	-0,139
15,5	0,825	0,138	0,059	0,362	-0,108	-0,334	-0,284	-0,246	-0,074	-0,175	-0,144	-0,109	-0,261	-0,243	-0,210	-0,192	-0,102	-0,141	0,310	0,021	-0,594	-0,294	-0,055	-0,287	-0,242	0,240	0,050	0,014	-0,033	-0,290	-0,139
24,8	0,597	0,087	0,082	0,288	-0,041	-0,270	-0,203	-0,114	-0,125	-0,121	-0,164	-0,139	-0,212	-0,120	-0,195	-0,207	-0,104	-0,166	0,127	-0,161	-0,413	-0,226	-0,045	-0,202	-0,192	0,078	0,029	0,050	0,026	-0,182	-0,143
37,2	0,292	-0,028	0,009	0,291	-0,003	-0,205	-0,141	-0,262	-0,223	-0,172	-0,128	-0,144	-0,198	-0,144	-0,150	-0,113	-0,089	-0,161	0,146	-0,173	-0,255	-0,087	-0,026	-0,163	-0,343	0,050	-0,106	-0,066	0,035	-0,110	-0,120
46,5	0,234	0,015	0,026	0,339	0,006	-0,239	-0,152	-0,332	-0,084	-0,198	-0,122	-0,120	-0,248	-0,039	-0,187	-0,128	-0,058	-0,101	0,074	-0,048	-0,131	-0,018	-0,008	-0,146	-0,247	-0,030	-0,158	-0,057	0,021	-0,081	-0,072

X=8771 mm

	-150	-140	-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
3	0,804	0,154	0,593	0,367	0,018	-0,248	0,556	0,601	0,024	0,099	-0,035	-0,474	-0,401	0,119	0,506	-0,331	-0,195	0,236	0,139	-0,142	-0,377	-0,136	0,200	-1,056	-0,506	-0,124	0,000	-0,662	-0,224	-0,117	-0,010
7,1	0,841	0,330	0,479	0,170	0,077	-0,413	0,232	0,542	0,260	-0,025	-0,006	-0,119	-0,130	0,200	0,404	-0,452	-0,170	0,009	-0,122	0,123	-0,382	-0,055	0,468	-1,495	-0,084	0,168	0,326	-0,924	-0,366	-0,170	-0,028
15,5	0,573	0,053	0,382	-0,302	-0,085	0,039	0,321	0,269	0,004	-0,139	-0,239	-0,110	-0,086	0,096	-0,229	-0,466	0,039	-0,060	-0,227	0,013	-0,262	0,047	0,346	-1,035	0,062	0,260	0,036	-0,504	-0,304	-0,046	-0,265
24,8	0,351	0,109	0,033	-0,303	-0,163	0,217	-0,034	0,154	0,039	-0,195	-0,257	-0,140	-0,071	-0,041	-0,105	-0,338	0,059	-0,370	-0,131	-0,083	-0,129	0,082	-0,010	-0,172	0,201	0,135	-0,111	-0,524	-0,232	-0,125	-0,169
37,2	0,148	-0,077	-0,332	-0,255	-0,254	0,187	-0,195	0,027	-0,039	-0,182	-0,325	-0,096	-0,101	-0,069	-0,185	-0,292	-0,126	-0,187	-0,015	-0,223	-0,202	-0,033	-0,174	0,661	0,037	-0,111	-0,128	-0,392	-0,200	-0,112	-0,192
46,5	0,251	-0,279	-0,527	-0,104	-0,500	0,187	-0,279	-0,168	0,036	-0,375	-0,358	-0,077	-0,020	-0,091	-0,221	-0,220	-0,238	-0,192	0,043	-0,218	-0,121	0,062	-0,065	0,818	-0,175	-0,280	-0,069	0,018	0,018	-0,159	-0,176

O Efeito da Vegetação na Resistência ao Escoamento em Canais Naturais

X=8925 mm

	-150	-140	-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
3	0,540	0,561	1,166	0,123	0,296	0,737	0,093	0,670	0,376	-0,503	-0,243	0,794	-0,252	0,315	0,423	0,066	0,235	0,191	0,171	0,335	0,781	0,103	-0,545	-0,202	0,064	-0,001	0,666	1,143	0,391	-0,072	0,142
7,1	0,517	0,480	0,977	0,138	0,274	0,467	0,518	0,579	0,237	-0,206	-0,049	0,641	-0,086	-0,045	0,293	0,073	0,131	0,388	0,532	0,611	1,580	0,422	-0,566	-0,214	0,220	0,039	1,149	0,257	0,461	-0,494	0,949
15,5	0,516	0,446	1,009	0,238	0,156	0,308	0,351	0,344	0,364	-0,059	0,103	0,698	0,543	-0,042	0,287	0,155	0,055	0,172	0,264	0,390	1,004	0,227	-0,039	-0,129	-0,001	-0,126	0,296	0,102	0,287	-0,328	0,316
24,8	0,466	0,328	0,622	0,121	0,323	0,331	0,268	0,368	0,282	0,180	-0,095	0,483	0,434	-0,102	0,120	0,045	0,021	0,111	0,229	0,140	0,532	0,294	0,025	-0,144	-0,304	-0,004	0,260	0,211	0,321	0,097	-0,074
37,2	0,496	0,338	0,256	0,030	0,217	0,274	0,138	0,449	0,459	0,085	-0,233	0,129	0,327	0,131	0,072	-0,034	0,011	-0,077	0,135	-0,005	0,342	0,181	-0,037	-0,138	-0,268	-0,056	0,085	0,086	0,101	0,135	-0,386
46,5	0,214	0,313	0,109	-0,081	-0,238	0,039	-0,137	0,348	0,291	0,002	-0,211	0,212	0,361	-0,103	-0,094	0,085	-0,141	-0,155	0,075	0,072	0,124	0,019	-0,031	-0,211	-0,260	-0,164	-0,203	-0,031	-0,038	-0,102	-0,409

X=9025 mm

	-150	-140	-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
3	0,223	0,138	0,466	0,496	-0,128	-0,307	-0,148	0,185	-0,353	-0,575	-0,478	-0,326	0,070	0,817	0,261	-0,135	-0,918	-0,797	0,069	0,838	-0,082	0,330	-0,633	-0,458	-0,007	0,287	0,346	0,346	0,593	0,026	-0,200
7,1	0,402	0,100	0,278	0,561	0,078	-0,009	0,073	0,524	-0,110	-0,481	-0,525	-0,170	0,217	1,001	0,240	-0,170	-0,763	-0,533	0,352	0,828	-0,351	0,315	-0,490	-0,362	-0,177	0,258	0,420	0,420	0,618	0,249	-0,099
15,5	0,370	-0,020	-0,098	0,249	0,174	0,188	0,106	0,602	0,162	-0,283	-0,566	-0,137	0,203	0,960	0,159	-0,073	-0,275	0,347	0,544	0,548	-0,592	-0,152	-0,283	-0,265	-0,268	0,213	0,485	0,578	0,407	0,211	-0,144
24,8	0,145	-0,004	-0,106	0,173	0,175	0,235	0,119	0,358	0,285	-0,072	-0,357	-0,042	0,131	0,551	0,056	-0,075	0,000	0,756	0,550	0,264	-0,426	-0,342	-0,221	-0,182	-0,185	0,181	0,319	0,389	0,312	0,159	-0,147
37,2	0,028	-0,132	0,084	0,042	-0,016	-0,019	0,125	0,340	0,254	-0,140	-0,216	-0,007	0,049	0,391	-0,061	-0,125	-0,053	0,759	0,373	-0,074	-0,184	-0,220	-0,210	-0,067	-0,054	0,043	-0,017	0,058	0,278	0,066	-0,121
46,5	0,084	-0,292	0,233	0,125	-0,183	0,035	0,033	0,286	0,254	-0,185	-0,101	-0,175	-0,015	0,292	-0,073	-0,179	-0,143	0,579	0,254	-0,164	-0,084	-0,076	-0,181	-0,153	-0,009	0,142	-0,123	-0,231	0,119	0,075	-0,123

X=9178 mm

	-150	-140	-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
3	0,009	-0,058	-0,259	0,355	0,256	0,221	0,130	0,701	0,383	0,351	-0,067	0,163	0,176	0,201	0,112	-0,203	-0,058	0,585	0,439	0,307	0,128	-0,085	0,222	0,234	0,063	-0,001	-0,019	0,230	0,349	-0,044	0,093
7,1	-0,096	0,087	0,003	0,440	0,678	0,100	0,135	0,568	0,334	0,314	-0,196	0,270	0,140	0,247	0,053	-0,211	-0,258	0,476	0,433	0,442	0,096	-0,309	0,189	0,101	0,187	0,134	0,073	0,343	0,623	-0,025	0,118
15,5	-0,278	0,319	0,256	0,280	0,363	0,034	0,257	0,346	0,293	0,079	-0,292	0,081	0,045	0,175	0,013	-0,385	-0,325	0,371	0,426	0,355	-0,006	-0,296	-0,231	0,006	0,164	0,210	0,086	0,225	0,460	-0,021	-0,031
24,8	-0,156	0,388	0,305	0,030	0,506	0,092	0,185	0,154	0,294	0,047	-0,292	0,058	0,044	0,024	-0,081	-0,385	-0,325	0,371	0,426	0,355	-0,006	-0,296	-0,231	0,006	0,164	0,210	0,085	0,111	0,334	0,051	-0,177
37,2	-0,013	0,293	0,279	0,036	0,247	0,092	-0,034	0,038	0,087	0,038	-0,219	0,078	-0,069	-0,109	-0,120	-0,262	-0,178	0,187	0,338	0,278	0,037	-0,219	-0,137	0,103	0,049	0,117	-0,014	0,067	0,320	0,150	-0,079
46,5	-0,002	0,203	0,149	0,011	0,115	0,022	-0,078	-0,034	-0,012	0,040	-0,140	0,000	-0,063	-0,135	-0,088	-0,270	-0,356	0,122	0,196	0,178	-0,011	-0,178	0,045	-0,044	0,010	0,042	-0,027	-0,031	0,268	0,065	-0,065

O Efeito da Vegetação na Resistência ao Escoamento em Canais Naturais

X=9280 mm

	-150	-140	-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
3	-0,071	0,393	0,392	0,527	-0,479	0,353	0,081	1,118	-0,274	1,702	0,340	0,387	-0,743	1,369	3,103	0,565	-0,968	-1,484	-2,035	-0,895	-0,072	0,049	-0,216	1,580	0,600	-0,345	-0,013	0,112	-0,273	-0,356	0,035
7,1	-0,018	0,142	0,468	0,423	-0,267	-0,123	-0,429	1,632	0,029	1,004	0,554	0,656	-0,063	1,853	2,592	0,609	-1,086	-1,286	-1,009	-1,023	-0,676	0,245	-0,505	1,463	0,439	0,021	-0,053	0,237	0,404	-0,380	0,059
15,5	0,450	0,252	0,438	0,229	-0,371	0,079	-0,242	2,041	0,348	0,380	0,453	0,317	0,643	1,987	1,267	0,440	-0,254	-0,933	-0,310	-0,727	-1,194	0,385	-0,140	0,806	0,694	0,151	0,081	0,508	1,011	0,117	-0,229
24,8	0,259	0,111	0,380	0,066	-0,778	-0,032	-0,305	1,341	0,386	-0,036	0,248	0,168	0,880	1,602	0,946	0,728	0,195	-0,002	-0,100	-0,640	-1,161	0,176	0,186	0,607	0,428	0,276	-0,014	0,446	0,775	0,173	-0,009
37,2	0,231	0,133	0,161	0,040	-0,851	-0,065	0,124	1,078	0,139	-0,097	0,119	-0,045	0,493	0,593	0,435	0,378	0,235	0,272	-0,313	-0,574	-0,701	-0,026	0,217	0,540	0,670	0,175	-0,058	0,122	0,459	0,285	0,226
46,5	0,307	0,014	0,152	0,014	-0,687	-0,403	-0,085	0,732	-0,177	-0,257	-0,057	-0,387	0,293	0,178	0,313	0,359	0,282	0,393	-0,273	-0,427	-0,399	-0,079	0,181	0,487	0,335	-0,186	-0,127	0,045	0,304	0,153	0,315

$$\overline{w'w'} \times 10^{-3} (m/s)$$

X=8516 mm

	-150	-140	-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
3	0,184	0,123	0,160	0,117	0,159	0,213	0,245	0,202	0,168	0,156	0,181	0,216	0,306	0,224	0,229	0,224	0,199	0,168	0,527	0,968	0,980	0,468	0,747	0,650	0,406	0,315	0,445	0,812	0,742	0,426	0,320
7,1	0,168	0,130	0,200	0,137	0,148	0,209	0,231	0,191	0,162	0,182	0,271	0,228	0,305	0,237	0,216	0,238	0,244	0,218	0,540	0,896	0,981	0,445	0,688	0,640	0,424	0,346	0,460	0,811	0,757	0,442	0,376
15,5	0,304	0,150	0,179	0,136	0,161	0,213	0,245	0,202	0,168	0,156	0,181	0,216	0,306	0,224	0,229	0,227	0,223	0,227	0,462	0,905	0,932	0,488	0,650	0,636	0,427	0,401	0,457	0,767	0,741	0,543	0,380
24,8	0,224	0,152	0,187	0,136	0,178	0,193	0,222	0,214	0,188	0,184	0,201	0,259	0,282	0,258	0,210	0,238	0,247	0,239	0,514	0,950	0,957	0,533	0,774	0,676	0,471	0,384	0,558	0,816	0,706	0,604	0,394
37,2	0,198	0,157	0,189	0,143	0,205	0,203	0,319	0,230	0,189	0,181	0,193	0,228	0,244	0,271	0,260	0,255	0,232	0,218	0,588	1,015	0,930	0,597	0,819	0,768	0,491	0,438	0,615	0,917	0,762	0,614	0,424
46,5	0,275	0,200	0,197	0,149	0,207	0,222	0,238	0,236	0,175	0,171	0,193	0,243	0,240	0,264	0,268	0,208	0,231	0,246	0,596	0,885	0,998	0,619	0,775	0,760	0,504	0,461	0,631	0,910	0,757	0,586	0,397

X=8669 mm

	-150	-140	-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
3	0,234	0,239	0,349	0,400	0,318	0,190	0,163	0,611	0,695	0,186	0,157	0,206	0,301	0,519	0,374	0,130	0,169	0,245	0,353	0,304	0,209	0,207	0,214	0,217	0,213	0,531	0,291	0,213	0,179	0,162	0,283
7,1	0,321	0,305	0,374	0,416	0,357	0,213	0,192	0,550	0,690	0,190	0,177	0,214	0,309	0,459	0,404	0,180	0,172	0,255	0,398	0,386	0,257	0,245	0,264	0,208	0,221	0,488	0,331	0,208	0,195	0,158	0,265
15,5	0,375	0,367	0,415	0,455	0,417	0,262	0,226	0,591	0,735	0,232	0,180	0,212	0,290	0,444	0,465	0,222	0,221	0,298	0,411	0,379	0,266	0,233	0,251	0,225	0,256	0,488	0,387	0,254	0,217	0,196	0,263
24,8	0,428	0,393	0,468	0,444	0,423	0,295	0,242	0,574	0,786	0,249	0,189	0,203	0,311	0,469	0,428	0,215	0,225	0,284	0,404	0,390	0,257	0,257	0,252	0,218	0,267	0,469	0,362	0,245	0,216	0,223	0,263
37,2	0,415	0,400	0,447	0,460	0,473	0,303	0,255	0,596	0,713	0,263	0,191	0,206	0,298	0,450	0,446	0,206	0,217	0,295	0,439	0,405	0,290	0,259	0,274	0,221	0,320	0,517	0,389	0,254	0,229	0,199	0,225
46,5	0,372	0,379	0,447	0,510	0,494	0,302	0,242	0,551	0,641	0,237	0,183	0,199	0,290	0,435	0,411	0,190	0,220	0,288	0,415	0,417	0,277	0,239	0,245	0,217	0,287	0,534	0,342	0,234	0,203	0,198	0,241

X=8771 mm

	-150	-140	-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
3	0,628	0,374	0,580	0,658	0,450	0,885	0,890	0,583	0,936	0,916	0,844	0,487	0,505	0,774	1,266	0,463	0,798	0,713	0,952	0,607	0,415	0,563	0,793	0,735	0,838	0,589	0,542	0,631	0,435	0,451	0,596
7,1	0,838	0,403	0,622	0,662	0,523	0,833	0,863	0,673	1,092	0,882	0,859	0,529	0,534	0,787	1,070	0,575	0,720	0,771	0,993	0,685	0,439	0,603	0,868	0,796	0,742	0,639	0,762	0,728	0,409	0,399	0,622
15,5	0,862	0,467	0,741	0,798	0,618	0,933	0,735	0,670	1,015	0,800	0,838	0,570	0,540	0,822	0,931	0,622	0,911	0,741	1,035	0,633	0,449	0,666	0,914	0,806	0,770	0,693	0,735	0,667	0,500	0,574	0,612
24,8	0,878	0,352	0,808	0,789	0,518	0,881	0,746	0,667	1,070	0,823	0,835	0,603	0,578	0,774	0,918	0,575	1,029	0,825	1,178	0,631	0,488	0,701	0,973	0,850	0,847	0,727	0,696	0,753	0,493	0,567	0,692
37,2	0,806	0,408	0,937	0,771	0,494	0,825	0,731	0,653	1,018	0,807	0,670	0,539	0,587	0,738	0,921	0,560	1,055	1,039	1,237	0,675	0,504	0,635	1,009	0,822	0,812	0,724	0,665	0,733	0,526	0,623	0,726
46,5	0,731	0,472	1,007	0,788	0,498	0,857	0,729	0,634	0,915	0,718	0,754	0,513	0,513	0,730	0,872	0,559	0,709	0,806	1,155	0,647	0,480	0,663	0,955	0,794	0,741	0,752	0,601	0,538	0,538	0,646	0,762

O Efeito da Vegetação na Resistência ao Escoamento em Canais Naturais

X=8925 mm

	-150	-140	-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
3	0,552	0,477	0,747	0,471	0,608	0,643	0,446	0,490	0,812	0,571	0,522	0,894	0,737	0,733	0,558	0,339	0,411	0,447	0,463	0,502	0,644	0,562	0,650	0,401	0,212	0,212	0,220	1,156	1,158	0,654	0,273
7,1	0,596	0,571	0,758	0,546	0,703	0,701	0,593	0,601	0,883	0,579	0,484	0,933	0,830	0,828	0,618	0,383	0,426	0,479	0,504	0,641	0,946	0,601	0,793	0,410	0,201	0,199	0,358	0,969	1,147	0,569	0,566
15,5	0,712	0,712	0,876	0,573	0,767	0,625	0,703	0,624	0,822	0,568	0,550	0,882	0,989	0,787	0,648	0,432	0,457	0,515	0,486	0,599	0,802	0,582	0,716	0,446	0,193	0,250	0,247	1,042	1,286	0,616	0,624
24,8	0,663	0,842	0,887	0,601	0,801	0,698	0,716	0,647	0,878	0,580	0,576	0,905	0,863	0,824	0,731	0,463	0,475	0,560	0,491	0,525	0,662	0,584	0,741	0,388	0,547	0,208	0,236	1,051	1,069	0,795	0,597
37,2	0,748	0,836	0,916	0,601	0,894	0,720	0,746	0,735	0,885	0,626	0,584	0,897	0,827	0,922	0,802	0,471	0,512	0,556	0,504	0,642	0,688	0,651	0,818	0,420	0,585	0,236	0,231	1,167	1,145	0,786	0,821
46,5	0,779	0,898	0,964	0,634	0,907	0,706	0,810	0,769	0,923	0,662	0,634	0,883	0,844	0,919	0,711	0,473	0,489	0,557	0,476	0,554	0,628	0,574	0,788	0,376	0,548	0,224	0,201	0,990	1,043	0,694	0,644

X=9025 mm

	-150	-140	-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
3	0,414	0,481	0,851	0,716	0,439	0,506	0,395	0,324	0,458	0,831	0,841	0,750	0,364	0,355	0,310	0,290	0,489	0,678	0,787	0,702	0,630	0,541	0,388	0,302	0,228	0,280	0,373	0,373	0,561	0,315	0,363
7,1	0,472	0,548	0,852	0,810	0,451	0,525	0,411	0,361	0,459	0,791	0,900	0,713	0,459	0,477	0,374	0,335	0,456	0,684	0,801	0,842	0,710	0,583	0,404	0,333	0,280	0,322	0,420	0,420	0,596	0,404	0,310
15,5	0,521	0,604	0,789	0,764	0,515	0,567	0,431	0,430	0,479	0,741	0,986	0,797	0,560	0,607	0,428	0,350	0,482	0,693	0,883	0,793	0,705	0,578	0,419	0,384	0,337	0,408	0,525	1,012	0,587	0,451	0,351
24,8	0,510	0,640	0,801	0,764	0,504	0,545	0,458	0,426	0,483	0,720	0,983	0,716	0,581	0,600	0,472	0,379	0,590	0,833	0,960	0,748	0,689	0,582	0,453	0,419	0,380	0,471	0,601	1,095	0,568	0,439	0,353
37,2	0,501	0,688	0,806	0,760	0,533	0,586	0,443	0,454	0,544	0,801	0,983	0,762	0,568	0,575	0,470	0,417	0,570	0,959	0,982	0,747	0,646	0,543	0,487	0,435	0,392	0,452	0,572	1,132	0,531	0,503	0,361
46,5	0,539	0,701	0,762	0,745	0,541	0,591	0,448	0,467	0,544	0,813	0,931	0,811	0,520	0,549	0,463	0,410	0,579	0,947	0,973	0,760	0,670	0,555	0,486	0,443	0,416	0,437	0,562	1,168	0,521	0,482	0,358

X=9178 mm

	-150	-140	-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
3	0,148	0,154	0,177	0,447	0,511	0,211	0,339	0,524	0,267	0,195	0,147	0,387	0,330	0,162	0,174	0,121	0,325	0,499	0,222	0,135	0,131	0,226	0,578	0,387	0,205	0,182	0,167	0,248	0,276	0,200	0,179
7,1	0,194	0,210	0,229	0,688	0,632	0,263	0,385	0,568	0,336	0,235	0,182	0,442	0,427	0,218	0,172	0,151	0,362	0,558	0,283	0,194	0,188	0,286	0,697	0,451	0,265	0,222	0,217	0,335	0,413	0,250	0,216
15,5	0,285	0,269	0,309	0,674	0,738	0,280	0,515	0,542	0,345	0,246	0,198	0,514	0,426	0,251	0,223	0,193	0,405	0,573	0,424	0,264	0,239	0,346	0,658	0,470	0,325	0,296	0,262	0,386	0,472	0,305	0,249
24,8	0,292	0,306	0,335	0,608	0,700	0,320	0,430	0,583	0,354	0,254	0,204	0,512	0,432	0,240	0,223	0,193	0,405	0,573	0,424	0,264	0,239	0,346	0,658	0,470	0,325	0,296	0,302	0,378	0,413	0,311	0,252
37,2	0,271	0,309	0,341	0,651	0,651	0,305	0,476	0,579	0,369	0,266	0,216	0,578	0,490	0,223	0,227	0,204	0,435	0,642	0,443	0,275	0,246	0,359	0,644	0,469	0,315	0,300	0,303	0,397	0,422	0,340	0,236
46,5	0,269	0,285	0,329	0,598	0,684	0,323	0,475	0,598	0,380	0,265	0,217	0,581	0,508	0,210	0,220	0,202	0,359	0,605	0,414	0,254	0,233	0,320	0,631	0,443	0,311	0,281	0,294	0,365	0,417	0,314	0,213

O Efeito da Vegetação na Resistência ao Escoamento em Canais Naturais

X=9280 mm

	-150	-140	-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
3	1,452	1,130	1,199	0,693	1,077	0,954	1,018	1,366	0,762	0,996	0,708	1,128	1,144	1,383	1,194	1,350	1,791	1,345	0,987	1,222	0,925	0,998	1,034	1,361	1,213	0,679	0,452	0,600	0,820	1,079	1,080
7,1	1,381	1,299	1,417	0,764	1,163	0,975	1,113	1,262	0,464	1,150	0,756	1,199	1,098	1,339	1,375	1,187	1,634	1,134	0,944	1,277	1,092	1,112	1,094	1,563	1,451	0,784	0,491	0,494	0,861	1,175	1,180
15,5	1,369	1,207	1,412	0,807	1,208	1,012	1,337	1,143	0,496	1,069	0,724	1,142	1,013	1,324	0,862	1,106	1,305	1,028	1,018	1,334	1,284	1,064	1,067	1,360	1,212	0,831	0,494	1,276	1,024	1,170	1,154
24,8	1,356	1,278	1,323	0,839	1,170	1,138	1,361	1,258	0,511	1,096	0,744	1,212	1,011	1,326	0,796	1,056	1,345	1,258	1,119	1,097	1,172	0,939	1,194	1,344	1,241	0,818	0,529	1,530	1,120	1,249	1,147
37,2	1,527	1,339	1,459	0,858	1,145	1,212	1,396	1,262	0,571	1,093	0,724	1,200	1,060	1,208	0,874	1,013	1,453	1,240	1,081	1,018	1,041	0,862	1,191	1,393	1,175	0,864	0,508	1,495	1,105	1,267	1,142
46,5	1,474	1,293	1,408	0,839	1,123	1,154	1,482	1,070	0,586	1,159	0,783	1,240	1,159	1,305	0,943	1,037	1,523	1,343	1,045	0,972	0,957	0,838	1,260	1,395	1,159	0,879	0,438	1,442	1,132	1,218	1,228

DANS

X=5976 mm

$Z \text{ (mm)}$	$H \text{ (mm)}$	z/H	$\langle \bar{u} \rangle$	$\langle \bar{u}'\bar{u}' \rangle \times 10^2$	$\langle \tilde{u}\tilde{u} \rangle \times 10^3$	$\tau_x \times 10^3$
3	83,301	0,036	0,040	0,006	0,060	0,120
7	83,301	0,084	0,044	0,006	0,082	0,138
20,83	83,301	0,250	0,053	0,005	0,068	0,114
33,32	83,301	0,400	0,056	0,005	0,081	0,127
49,98	83,301	0,600	0,058	0,004	0,034	0,073
62,48	83,301	0,750	0,058	0,004	0,046	0,088

X=8516 mm

$Z \text{ (mm)}$	$H \text{ (mm)}$	z/H	$\langle \bar{u} \rangle$	$\langle \bar{w} \rangle$	$\langle \bar{u}'\bar{u}' \rangle \times 10^2$	$\langle \bar{w}'\bar{w}' \rangle \times 10^3$	$\langle \tilde{u}\tilde{u} \rangle \times 10^3$	$\langle \tilde{w}\tilde{w} \rangle \times 10^3$	$\langle \bar{u}'\bar{w}' \rangle \times 10^3$	$\langle \tilde{u}\tilde{w} \rangle \times 10^3$	$\tau_x \times 10^3$	$\tau_z \times 10^3$	$\tau_{xz} \times 10^3$
3	62,378	0,048	0,069	0,002	0,088	0,364	0,283	0,007	-1,742	-0,007	1,074	0,342	1,616
7,1	62,378	0,114	0,070	0,001	0,086	0,372	0,249	0,006	-1,672	-0,004	1,026	0,349	1,549
15,5	62,378	0,248	0,070	0,001	0,088	0,372	0,220	0,004	-1,606	0,000	1,016	0,347	1,483
24,8	62,378	0,398	0,072	0,000	0,088	0,392	0,174	0,002	-1,551	0,001	0,970	0,364	1,432
37,2	62,378	0,596	0,071	0,000	0,087	0,416	0,175	0,002	-1,723	-0,003	0,965	0,386	1,594
46,5	62,378	0,745	0,074	0,000	0,090	0,414	0,182	0,001	-1,671	-0,006	1,001	0,384	1,549

X=8669 mm

$Z \text{ (mm)}$	$H \text{ (mm)}$	z/H	$\langle \bar{u} \rangle$	$\langle \bar{w} \rangle$	$\langle \bar{u}'\bar{u}' \rangle \times 10^2$	$\langle \bar{w}'\bar{w}' \rangle \times 10^3$	$\langle \tilde{u}\tilde{u} \rangle \times 10^3$	$\langle \tilde{w}\tilde{w} \rangle \times 10^3$	$\langle \bar{u}'\bar{w}' \rangle \times 10^3$	$\langle \tilde{u}\tilde{w} \rangle \times 10^3$	$\tau_x \times 10^3$	$\tau_z \times 10^3$	$\tau_{xz} \times 10^3$
3	62,378	0,048	0,075	-0,001	0,055	0,286	0,198	0,008	-1,403	-0,022	0,691	0,272	1,317
7,1	62,378	0,114	0,074	-0,001	0,058	0,303	0,192	0,009	-1,314	-0,022	0,712	0,288	1,234
15,5	62,378	0,248	0,074	-0,001	0,057	0,330	0,183	0,007	-1,387	-0,019	0,693	0,311	1,299
24,8	62,378	0,398	0,074	-0,001	0,059	0,337	0,182	0,003	-1,420	-0,014	0,711	0,315	1,324
37,2	62,378	0,596	0,075	-0,001	0,058	0,344	0,174	0,002	-1,435	-0,011	0,699	0,319	1,336
46,5	62,378	0,745	0,075	-0,001	0,056	0,330	0,142	0,002	-1,397	-0,009	0,648	0,307	1,299

X=8771 mm

$Z \text{ (mm)}$	$H \text{ (mm)}$	z/H	$\langle \bar{u} \rangle$	$\langle \bar{w} \rangle$	$\langle \bar{u}'\bar{u}' \rangle \times 10^2$	$\langle \bar{w}'\bar{w}' \rangle \times 10^3$	$\langle \bar{u}\bar{u} \rangle \times 10^3$	$\langle \bar{w}\bar{w} \rangle \times 10^3$	$\langle \bar{u}'\bar{w}' \rangle \times 10^3$	$\langle \bar{u}\bar{w} \rangle \times 10^3$	$\tau_x \times 10^3$	$\tau_z \times 10^3$	$\tau_{xz} \times 10^3$
3	62,378	0,048	0,083	0,000	0,172	0,674	0,867	0,016	-3,622	0,019	2,389	0,637	3,329
7,1	62,378	0,114	0,081	0,000	0,169	0,707	0,868	0,019	-3,387	0,034	2,365	0,671	3,097
15,5	62,378	0,248	0,078	-0,001	0,164	0,731	0,824	0,009	-3,494	0,022	2,273	0,684	3,208
24,8	62,378	0,398	0,076	-0,001	0,169	0,750	0,906	0,003	-3,805	-0,002	2,394	0,697	3,518
37,2	62,378	0,596	0,077	-0,001	0,173	0,750	0,788	0,004	-4,112	-0,019	2,326	0,696	3,817
46,5	62,378	0,745	0,077	-0,001	0,174	0,712	0,905	0,006	-4,137	-0,041	2,444	0,663	3,860

X=8925 mm

$Z \text{ (mm)}$	$H \text{ (mm)}$	z/H	$\langle \bar{u} \rangle$	$\langle \bar{w} \rangle$	$\langle \bar{u}'\bar{u}' \rangle \times 10^2$	$\langle \bar{w}'\bar{w}' \rangle \times 10^3$	$\langle \bar{u}\bar{u} \rangle \times 10^3$	$\langle \bar{w}\bar{w} \rangle \times 10^3$	$\tau_x \times 10^3$	$\tau_z \times 10^3$
3	62,378	0,048	0,065	0,003	0,222	0,567	1,227	0,017	3,187	0,539
7,1	62,378	0,114	0,066	0,003	0,249	0,626	1,358	0,020	3,555	0,597
15,5	62,378	0,248	0,065	0,003	0,246	0,649	1,158	0,009	3,343	0,608
24,8	62,378	0,398	0,070	0,002	0,261	0,665	1,168	0,005	3,489	0,618
37,2	62,378	0,596	0,071	0,001	0,256	0,709	1,067	0,004	3,353	0,659
46,5	62,378	0,745	0,072	0,000	0,246	0,687	0,933	0,004	3,133	0,638

X=9025 mm

$Z \text{ (mm)}$	$H \text{ (mm)}$	Z/h	$\langle \bar{u} \rangle$	$\langle \bar{w} \rangle$	$\langle \bar{u}'\bar{u}' \rangle \times 10^2$	$\langle \bar{w}'\bar{w}' \rangle \times 10^3$	$\langle \bar{u}\bar{u} \rangle \times 10^3$	$\langle \bar{w}\bar{w} \rangle \times 10^3$	$\langle \bar{u}'\bar{w}' \rangle \times 10^3$	$\langle \bar{u}\bar{w} \rangle \times 10^3$	$\tau_x \times 10^3$	$\tau_z \times 10^3$	$\tau_{xz} \times 10^3$
3	62,378	0,048	0,082	0,000	0,112	0,495	0,560	0,019	-4,298	0,011	1,548	0,475	3,961
7,1	62,378	0,114	0,083	0,001	0,104	0,532	0,501	0,018	-4,128	0,012	1,427	0,508	3,803
15,5	62,378	0,248	0,082	0,001	0,102	0,586	0,376	0,013	-4,167	0,009	1,290	0,553	3,842
24,8	62,378	0,398	0,081	0,001	0,102	0,605	0,343	0,008	-4,133	-0,005	1,263	0,566	3,823
37,2	62,378	0,596	0,079	0,000	0,104	0,619	0,400	0,004	-4,039	-0,015	1,331	0,576	3,746
46,5	62,378	0,745	0,079	0,000	0,106	0,619	0,432	0,004	-3,919	-0,015	1,376	0,576	3,635

X=9178 mm

$Z \text{ (mm)}$	$H \text{ (mm)}$	z/H	$\langle \bar{u} \rangle$	$\langle \bar{w} \rangle$	$\langle \bar{u}'\bar{u}' \rangle \times 10^2$	$\langle \bar{w}'\bar{w}' \rangle \times 10^3$	$\langle \bar{u}\bar{u} \rangle \times 10^3$	$\langle \bar{w}\bar{w} \rangle \times 10^3$	$\tau_x \times 10^3$	$\tau_z \times 10^3$
3	62,378	0,048	0,086	0,002	0,072	0,266	0,225	0,005	0,874	0,250
7,1	62,378	0,114	0,086	0,002	0,078	0,331	0,291	0,006	0,987	0,312
15,5	62,378	0,248	0,082	0,001	0,082	0,377	0,259	0,006	1,001	0,353
24,8	62,378	0,398	0,082	0,001	0,083	0,376	0,234	0,005	0,987	0,352
37,2	62,378	0,596	0,083	0,000	0,081	0,386	0,223	0,003	0,957	0,360
46,5	62,378	0,745	0,084	0,000	0,081	0,374	0,208	0,002	0,937	0,347

X=9280 mm

$Z \text{ (mm)}$	$H \text{ (mm)}$	z/H	$\langle \bar{u} \rangle$	$\langle \bar{w} \rangle$	$\langle \bar{u}'\bar{u}' \rangle \times 10^2$	$\langle \bar{w}'\bar{w}' \rangle \times 10^3$	$\langle \bar{u}\bar{u} \rangle \times 10^3$	$\langle \bar{w}\bar{w} \rangle \times 10^3$	$\tau_x \times 10^3$	$\tau_z \times 10^3$
3	62,378	0,048	0,069	0,001	0,326	1,069	1,246	0,092	4,161	1,073
7,1	62,378	0,114	0,076	0,002	0,353	1,104	1,141	0,074	4,314	1,088
15,5	62,378	0,248	0,080	0,003	0,321	1,092	1,040	0,048	3,926	1,053
24,8	62,378	0,398	0,085	0,002	0,298	1,115	0,763	0,030	3,457	1,058
37,2	62,378	0,596	0,083	0,001	0,276	1,122	1,026	0,015	3,497	1,050
46,5	62,378	0,745	0,088	0,000	0,277	1,125	0,748	0,010	3,248	1,049